

**HENRIQUE AUGUSTO BELIZÁRIO SANCHES**

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE DISPOSITIVO PARA MEDIÇÃO  
DE FORÇAS DE USINAGEM EM PROCESSO DE  
TORNEAMENTO**

**São Paulo  
2007**

**HENRIQUE AUGUSTO BELIZÁRIO SANCHES**

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE DISPOSITIVO PARA MEDIÇÃO  
DE FORÇAS DE USINAGEM EM PROCESSO DE  
TORNEAMENTO**

Monografia do Trabalho de Conclusão de  
Curso apresentado à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção da  
graduação em Engenharia Mecatrônica e  
Sistemas Mecânicos.

Área de Concentração:  
Engenharia Mecatrônica e Sistemas  
Mecânicos

Orientadora:  
Profa. Dra. Izabel Fernanda Machado

**São Paulo  
2007**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Sanches, Henrique Augusto Belizário**

**Projeto e construção de dispositivo para medição de forças de usinagem em processo de torneamento / H.A.B. Sanches. -- São Paulo, 2007.**

**63 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.**

**1.Torneamento 2.Usinagem 3.Extensômetro 4.Instrumentação e medidas elétricas I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.**

## **AGRADECIMENTOS**

À Professora Izabel Fernanda Machado pela orientação e dedicação durante o projeto, ao Sr. Francisco Faustino dos Reis e Jovinilo Oliveira dos Santos pelo auxílio na parte experimental, a Paulo Roberto Pereira Pinto Filho, pelo companheirismo e ajuda durante este projeto e a Cristiano Fernandes Lagatta pelo suporte computacional em MEF.

À Aços Villares Sidenor S.A pelo apoio (projeto CONSTRUMEC (FINEP-FIPT-Aços Villares S.A), ao CNPQ pela bolsa de iniciação tecnológica, à FAPESP pelo apoio no que se refere a boa parte dos equipamentos utilizados (processo 03/05490-4), ao Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) da Escola Politécnica da USP.

Sobretudo à minha família, que sempre me apoiou incondicionalmente.



## RESUMO

A instrumentação de dispositivos apresenta grande relevância na área de engenharia, sendo importante para o desenvolvimento e aprimoramento de novas tecnologias. Este trabalho principiou-se com a utilização de um dispositivo de aquisição de esforços já construído, mas que foi tornado operacional mediante calibração e adaptação ao sistema de aquisição disponível para análise de sinais.

Em uma etapa posterior, foi iniciado o projeto, construção e calibração de um novo dispositivo para medição de forças de corte durante o processo de torneamento. Similarmente ao dispositivo já existente, foram utilizados extensômetros para a obtenção de um sinal de voltagem, sinal este que é fornecido ao sistema de aquisição para digitalização, tratamento e apresentação de resultados. O novo dispositivo foi projetado para ser utilizado em tornos convencionais e de comando numérico (CNC), de tal forma a obter o perfil de forças de usinagem em uma grande gama de aplicações.

Durante a fase de projeto foram definidos dados como a geometria do dispositivo, material de cada um dos seus componentes assim como dos corpos de prova que por ele seriam usinados, seleção dos extensômetros adequados, disposição dos mesmos para melhor sensibilidade de medição e estudo de técnicas de amostragem, de forma a obter as taxas de aquisição adequadas. Estes dados foram considerados durante a fase construção do dispositivo, tendo por fim o levantamento da curva de calibração do aparelho.

A última etapa consistiu na realização de ensaios com ambos os dispositivos. Estes ensaios foram realizados com o mesmo material e parâmetros de usinagem, com a finalidade de comparar os resultados obtidos com os dois modelos construtivos e verificar a acurácia do sensor desenvolvido neste trabalho.

## **ABSTRACT**

Device instrumentation is a very important subject of engineering, leading to an increase in performance and development of new technologies. The first part of this project consisted on the calibration and adaptation of a device for machining forces acquisition, developed in previous work, to monitor these forces during turning processes.

The following parts were the project, construction and calibration of the new device for machining forces measurement. Strain gages were used in order to obtain a voltage signal, as the previous device. This signal was treated and digitalized by the acquisition system. The new device was projected to work in universal and CNC lathes.

During the device project, the geometry, material, strain gage selection and an optimal arrangement for best sensibility were defined. The device manufacture considered these parameters and the calibration curve was obtained.

The last part of this work consisted on comparative tests between the previous device and the manufactured one. The same workpiece and machining parameters were used in both tests, wherein the accuracy of the developed device was verified.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Esquema ferramenta e formação de cavaco.....	5
Figura 2. Força de usinagem e suas componentes.....	7
Figura 3. Cadeia de aquisição de sinais.....	10
Figura 4. Sinais passando pelo mesmo conjunto de pontos.....	12
Figura 5. Espectro de frequência respeitando Nyquist.....	13
Figura 6. Aliasing causado pela sobreposição de frequências.....	14
Figura 7. Esquema mostrando comportamento de condutor.....	15
Figura 8. Esquema dos eixos do extensômetro.....	16
Figura 9. Circuito da Ponte de Wheatstone com resistores.....	17
Figura 10. Exemplo de emprego do método dos elementos finitos.....	19
Figura 11. Dinamômetro digital utilizado na etapa de calibração.....	23
Figura 12. Modelo em CAD do dispositivo projetado.....	24
Figura 13. Placa superior do dispositivo.....	25
Figura 14. Placa inferior do dispositivo .....	26
Figura 15. Modelo em CAD de um dos anéis octogonais.....	28
Figura 16. Distribuição de tensões no anel octogonal.....	29
Figura 17. Outra vista mostrando a oposição de tensões.....	29
Figura 18. Estudo em MEF mostrando o perfil de deformação.....	30
Figura 19. Disposição do extensômetro .....	31
Figura 20. Foto do dispositivo construído.....	33
Figura 21. Dispositivo com a ponta do porta-ferramentas acoplada.....	34
Figura 22. Dispositivo com a haste posterior fixada.....	35
Figura 23. Fixação do cabo na placa inferior do dispositivo.....	36
Figura 24. Bancada e dinamômetros usados na calibração.....	37
Figura 25. Terminais de entrada do sistema de aquisição.....	38
Figura 26. Tela do AqDados mostrando o ajuste de canal.....	39
Figura 27. Calibração do canal da força de avanço no AqDados.....	40
Figura 28. PC operando o AqDados ao lado do torno.....	41
Figura 29. Força de Avanço e Força de Corte para o primeiro ensaio....	42
Figura 30. Dispositivo construído fixado ao torno durante o ensaio.....	44
Figura 31. Força de Avanço e Força de Corte para o segundo ensaio...44	

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades mecânicas do aço AISI 4140.....	21
Tabela 2. Análise do ensaio realizado com o primeiro dispositivo.....	43
Tabela 3. Análise do ensaio realizado com o dispositivo construído.....	45

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A - Área	[m <sup>2</sup> ]
AISI - American Iron and Steel Institute	
CNC - Comando Numérico Computadorizado	
E - Módulo de Elasticidade	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\varepsilon$ - Deformação	[mm/m]
f - Avanço	[mm/volta]
F <sub>c</sub> - Força de Corte	[N]
f <sub>a</sub> - Frequência de amostragem	[Hz]
F <sub>a</sub> - Força de Avanço	[N]
F <sub>p</sub> - Força de Penetração	[N]
GF - Gage Factor	[1]
HP - Horse Power	[W]
L - Comprimento	[m]
MEF - Método dos Elementos Finitos	
R - Resistência	[Ω]
ρ - Resistividade	[Ω*m <sup>2</sup> /m]
R <sub>a</sub> - Rugosidade média	[μm]
R <sub>t</sub> - Rugosidade total	[μm]
σ - Tensão	[N/mm <sup>2</sup> ]
V - Voltagem	[Volts]
ν - Coeficiente de Poisson	[1]

## SUMÁRIO

<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	<b>3</b>
2.1 Usinagem	3
2.2 Torneamento	5
2.3 Força de Corte no Torneamento	7
2.4 Usinabilidade	9
2.5 Aquisição de Sinais	10
2.6 Teoria de Amostragem	12
2.7 Extensometria	15
2.8 Ponte de Wheatstone	17
2.9 Método dos Elementos Finitos	19
<b>3 Materiais, Equipamentos e Métodos</b>	<b>21</b>
3.1 Materiais	21
3.2 Equipamentos	22
3.3 Métodos	24
<b>4 Resultados e Discussões</b>	<b>33</b>
4.1 Construção do Dispositivo	33
4.2 Calibração	37
4.3 Ensaios Comparativos	41
<b>5 Conclusões</b>	<b>46</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>47</b>
<b>Anexo 1</b>	<b>51</b>

## 1 Introdução

A instrumentação de dispositivos apresenta grande relevância na área de engenharia, sendo importante para o desenvolvimento e aprimoramento de novas tecnologias. Utilizando-se desta metodologia é possível verificar fenômenos e equipamentos, facilitando a compreensão de seu funcionamento e acompanhando sua evolução. Por exemplo, a aplicação de instrumentação se estende desde robótica, na qual os protótipos interagem com o ambiente por meio de sensores e acionadores, até as ciências biomédicas, onde pacientes que precisam de acompanhamento intensivo são monitorados por máquinas munidas de sensores. Estruturas como barragens e pontes são monitoradas periodicamente para verificar a evolução dos esforços a elas impostos e seus efeitos. Além disso, conforme explicado pela teoria de controle [1], dispositivos instrumentados oferecem a capacidade de retro-alimentação para um sistema, transformando uma malha aberta, mais sujeita a interferências e erros, em uma malha fechada, capaz de se auto-regular e manter a atividade por ela exercida estável.

Nos processos de usinagem, a instrumentação assume papel importante quando se deseja otimizar a fabricação de componentes, já que são muitas as variáveis do processo: velocidade de corte, velocidade de avanço, profundidade de corte, material da peça, material da ferramenta, geometria da ferramenta, condições da máquina de usinagem e vibração [2]. Obter informações pertinentes a cada um desses aspectos durante o processo de usinagem pode significar uma economia de recursos e energia, facilitando o processo de usinagem e tornando seus efeitos menos nocivos ao ambiente.

Este trabalho teve por objetivo projetar, construir e calibrar um porta-ferramentas para ser usado em operações de torneamento, fornecendo os valores das forças de corte e de avanço durante o processo de usinagem. Estes valores serão obtidos utilizando-se um sistema de aquisição acoplado à um microcomputador e poderão ser armazenados em formato de tabelas ou

graficamente para futuras consultas e comparações, de forma a permitir o levantamento do efeito dos parâmetros de torneamento.



## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Usinagem

Usinagem é um termo que cobre uma larga coleção de processos de manufatura que envolve a remoção de material para a produção de um determinado componente ou peça. Esta remoção de material visa: obtenção das formas finais, acabamento superficial adequado e se alcançar os valores de tolerância requeridos [3]. Quase todos os produtos manufaturados têm componentes que foram usinados.

O processo de corte ou de remoção de material (usinagem) depende de variáveis independentes de entrada, de variáveis dependentes e de interações entre as variáveis dependentes e independentes [4, 5].

Têm sido realizados muitos esforços no sentido de propor um modelo adequado para prever as forças de corte, vibração, qualidade da superfície. Esses modelos são empíricos, analíticos e mecanísticos [6, 7, 8, 9]. Os mecanismos complexos, as altas taxas de deformação, elevados gradientes de deformação e combinação de deformações elásticas e plásticas nas operações de usinagem tornam muito difícil fazer recomendações que se apliquem a todas as condições [7, 10]. No entanto, é importante que se tenha alguns parâmetros iniciais. Esses parâmetros normalmente vêm da experiência do operador ou de dispendiosos experimentos. A determinação das variáveis de usinagem do ponto de vista teórico é difícil de ser realizada, pois os fenômenos envolvidos no processo de usinagem são complexos e interagem entre si [9, 11].

Dentre as formas de se fazer uma avaliação das variáveis de usinagem selecionadas, está o estudo do material removido (cavacos). A formação do cavaco está diretamente relacionada com fatores como o ângulo de saída,

ângulo de folga da ferramenta e com as temperaturas atingidas [2]. A avaliação do material removido pode servir, então, como parâmetro de avaliação das variáveis de usinagem e do comportamento do material usinado. Outros fatores sempre importantes a serem analisados, principalmente do ponto de vista mais tecnológico, são o acabamento superficial e o desgaste da ferramenta [10, 12, 13, 14, 15].

## 2.2 Torneamento

O processo de torneamento consiste na utilização de ferramentas com corte em um único ponto, o qual é fixo. A ferramenta remove material de uma peça girante. No processo de corte, segundo Shaw [10] existem três áreas de interesse na região ferramenta-material usinado. A Figura 1 mostra essas áreas.

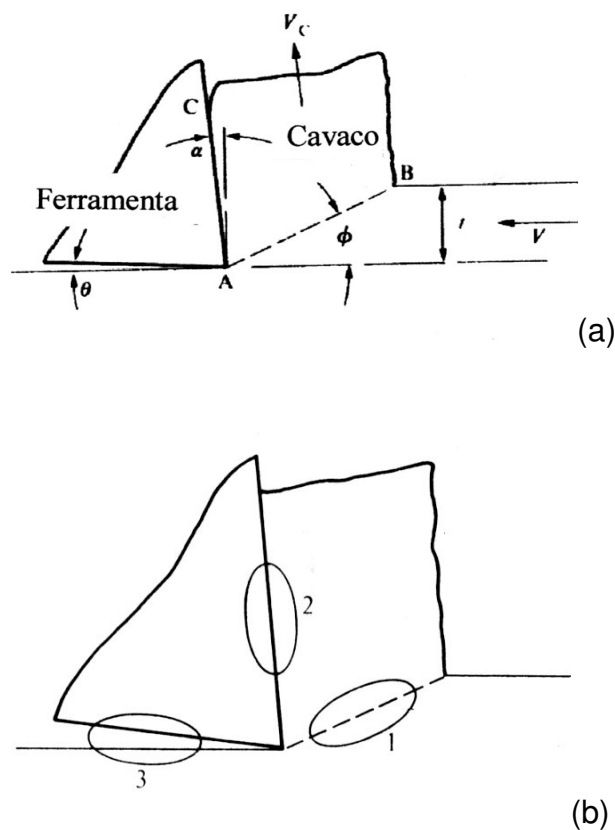


Figura 1. (a) Esquema ferramenta e formação de cavaco no processo usinagem por torneamento (b) Principais áreas de interesse na usinagem 1- está relacionada com o ângulo de cisalhamento, 2- com o ângulo de saída da ferramenta e 3- com o ângulo de folga.[10]

A primeira área se estende ao longo do plano de cisalhamento e forma a fronteira entre a região deformada e não deformada do material metálico. A segunda região está entre o cavaco e a face da ferramenta e a terceira esta entre a superfície usinada e o material adjacente a esta superfície.

Na primeira área, o interesse está focado nas características, ou mecanismos, de deformação plástica do material. Esses mecanismos são diferentes nos diferentes materiais. Portanto, os modelos são diferentes [16].

Já na segunda, temos o atrito e o desgaste da ferramenta ou da combinação ferramenta-material. O desgaste da ferramenta pode ocorrer de várias formas (desgaste adesivo, abrasivo, por difusão ou fadiga), ocorrendo interação com o meio.

Na terceira região, o interesse está na qualidade da superfície produzida e na rugosidade. A rugosidade está relacionada com a integridade da superfície, sendo a mais importante em uma superfície usinada [10]. A rugosidade é caracterizada pela presença de sulcos formados pela ferramenta durante o corte. A rugosidade é analisada em termos de parâmetros como rugosidade média ( $R_a$ ), rugosidade máxima ( $R_y$ ), rugosidade total ( $R_t$ ). Modelos associando a rugosidade com força de corte, entre outros parâmetros de usinagem, têm sido propostos na literatura [12, 13, 14, 15, 17].

## 2.3 Força de Corte no Torneamento

A força de usinagem é dada pela resultante dos esforços que atuam sobre a cunha cortante. Na verdade, não se trabalha com a força de usinagem propriamente dita, mas sim com suas componentes. A Figura 2 ilustra a força de usinagem e suas componentes na operação de torneamento.

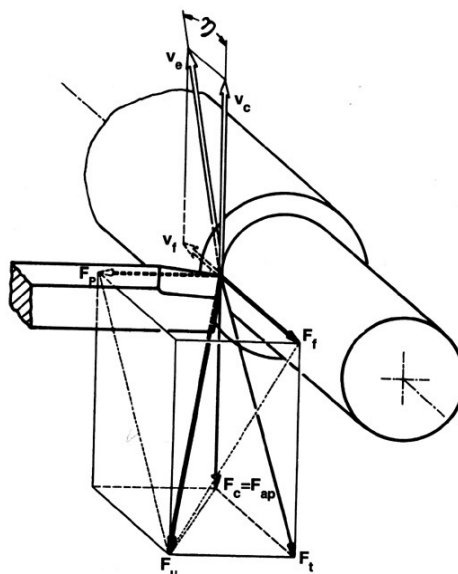


Figura 2. Força de usinagem e suas componentes na operação de torneamento.  $F_c$  é força de corte,  $F_t$  é a força de avanço e  $F_p$  é força passiva [18].

O conhecimento ou mesmo a estimativa dos esforços de usinagem máximos é utilizado, de um modo geral, para o dimensionamento do equipamento de usinagem [18, 19] e para projeto de ferramentas e dispositivos de usinagem. No entanto, esses esforços variam durante o processo de usinagem com a composição química e microestrutura do material, ângulo de saída da ferramenta e profundidade de corte [14, 20, 21]. Fatores como taxa de encruamento do material, também são muito relevantes. Se o material apresentar elevado encruamento durante a usinagem, as forças durante o corte também aumentarão. Usinagem, onde ocorre o mecanismo de cisalhamento adiabático [22], também são sensíveis a taxa de deformação do material e as forças de corte serão maiores, mesmo em elevadas velocidades de corte.

As medidas de força de corte podem ser realizadas acoplando um porta-ferramentas instrumentado com sensores capazes de medir, direta ou indiretamente, as componentes da força de usinagem. O sinal dos sensores é conectado a uma interface, que amplifica e filtra os sinais, que está ligada a um microcomputador. Esses sensores podem ser sensores piezelétricos [7, 10, 13, 20] ou extensômetros (*strain gages*) [18, 19]. Vários trabalhos [13, 23, 24, 25, 26, 27] têm sido realizados no sentido de usar a força de corte como forma de avaliar o processo de usinagem. Esses trabalhos têm diferentes abordagens, onde as forças de corte são correlacionadas com parâmetros que vão desde rugosidade, desgaste de ferramenta até microestrutura e propriedades mecânicas.

## 2.4 Usinabilidade

A usinabilidade de um material, bem como outras propriedades de fabricação, são tão importantes como as propriedades mecânicas e de resistência à corrosão.

A usinabilidade de um material metálico é influenciada por vários fatores tais como: composição química, microestrutura, resistência mecânica do material, avanço, velocidade de corte, profundidade de corte e escolha do fluido de corte [4, 5]. Dentre as variáveis que podem caracterizar a usinabilidade quatro delas são amplamente utilizadas, que são aspectos que caracterizam, por assim dizer a usinabilidade, que são a vida da ferramenta, acabamento superficial e forças de corte e, industrialmente, a produtividade é a variável de maior relevância.

Trabalho realizado por Dimla et al. [24, 25] faz uma revisão e avaliação dos diversos métodos que são utilizados para se avaliar a usinabilidade e que dão indicações da usinabilidade do material. Dentre esses métodos estão a emissão acústica, temperatura da ferramenta, forças de corte e vibração. A utilização de ultrassom, acabamento superficial também são indicados.

Geralmente, a usinabilidade de um material também é associada à sua dureza. Quanto mais duro o material, maior é a dificuldade para usiná-lo. No entanto, a usinabilidade parece mais relacionada com a microestrutura do material do que com sua dureza propriamente dita.

A usinabilidade também depende de variáveis do processo de usinagem, tais como rigidez da ferramenta, geometria e material da ferramenta, tipo do fluido de corte e tipo da operação de usinagem [24, 25].

## 2.5 Aquisição de Sinais

O propósito de uma medição é estabelecer um valor a uma variável ou a um conjunto de variáveis. Um sistema de aquisição deve conter elementos capazes de amplificar o sinal medido, quando necessário, filtrar ruídos eventualmente presentes, converter um sinal analógico para o formato digital e permitir a visualização e manipulação dos dados adquiridos [1]. A Figura 3 apresenta uma cadeia de aquisição, mostrando os principais componentes presentes e que serão descritos em detalhes a seguir.

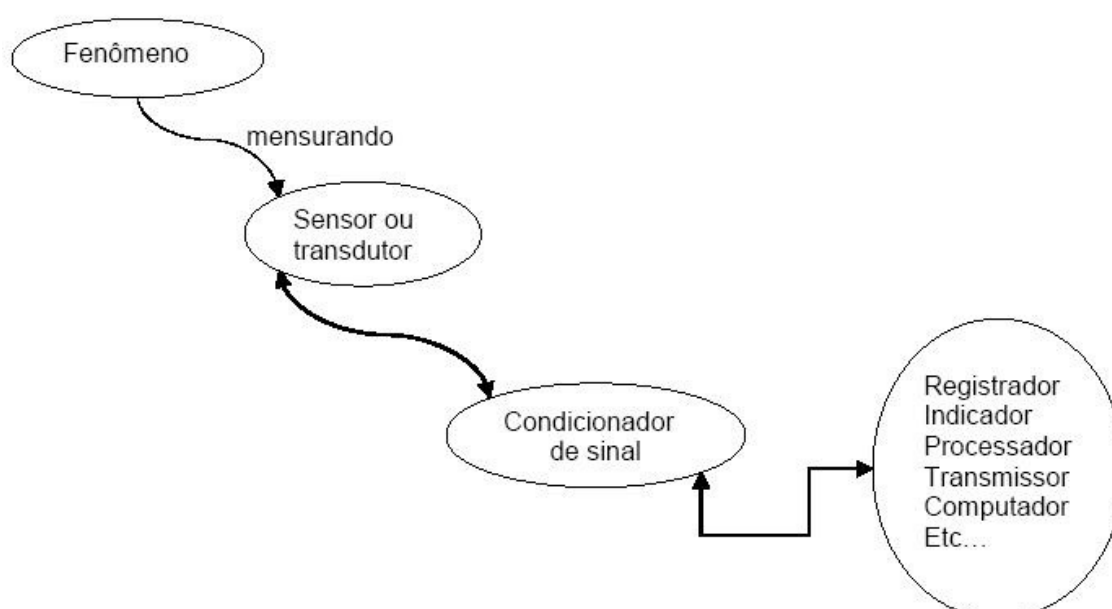


Figura 3. Cadeia de aquisição de sinais, iniciando com o fenômeno estudado até o processamento [28].

**Fenômeno:** atividade da qual se deseja extrair a medição de uma ou mais grandezas especificadas, como velocidade, força, composição química e outras. Cabe aqui ressaltar o fato de que algumas grandezas só podem ser medidas indiretamente, dependendo de uma correlação com outras variáveis, estas sim, mensuráveis.

**Sensor ou transdutor:** dispositivo capaz de converter a grandeza medida presente no fenômeno em uma variável de fácil manipulação. É bastante



comum a transformação de grandezas em variáveis como voltagem e deslocamento, uma vez que as últimas apresentam muita flexibilidade quanto à leitura e tratamento [1].

Condicionador de Sinal: Vários instrumentos que modificam o sinal adquirido incluem-se nesta categoria. Filtros são capazes de tratar o sinal de forma a reduzir ou extinguir ruídos, excluindo frequências não relevantes para o estudo do fenômeno. Amplificadores transformam sinais de baixa magnitude em sinais de alta magnitude. Conversores transformam um sinal analógico em digital, facilitando o tratamento matemático posterior, realizado através de computadores, por exemplo [1].

A calibração é um processo importante na aquisição de sinais, uma vez que sensores e transdutores só irão fornecer variáveis de saída aceitáveis quando devidamente calibrados. A calibração consiste na excitação do sistema por um valor conhecido e posterior comparação da variável de saída a um padrão. Ressalta-se que a precisão depende tanto das características do dispositivo a ser calibrado quanto da precisão de leitura das variáveis de entrada e de saída do sistema.

Deve-se efetuar novas calibrações sempre que o sistema sofrer alguma modificação, seja esta mecânica, química ou ambiental. A importância desta última não deve ser desprezada, pois muitos sensores são afetados pela temperatura, pressão ou mesmo umidade. Certos aspectos construtivos podem tornar o sistema insensível a estas mudanças, garantindo sua precisão mesmo quando utilizado em uma ampla faixa de condições externas.

## 2.6 Teoria de Amostragem

A amostragem de um sinal contínuo consiste em trocar os valores do sinal por um conjunto discreto de pontos, cujos valores são iguais ao valor do sinal nos chamados instantes de amostragem. Como resultado, a amostragem é uma seqüência de números obtidos em intervalos fixos de tempo (amostragem uniforme) [1].

O período de amostragem, que é o tempo decorrido entre duas amostragens consecutivas, será denominado  $T_a$ . A freqüência de amostragem é o inverso do período de amostragem [1], ou seja:

$$f_a = \frac{1}{T_a} \text{ para a freqüência em Hz, ou}$$

$$\omega_a = \frac{2 \cdot \pi}{T_a} \text{ para a freqüência em rad/s.}$$

Dado um conjunto de pontos, conforme exibido na Figura 4, existem infinitas funções às quais os pontos podem pertencer.

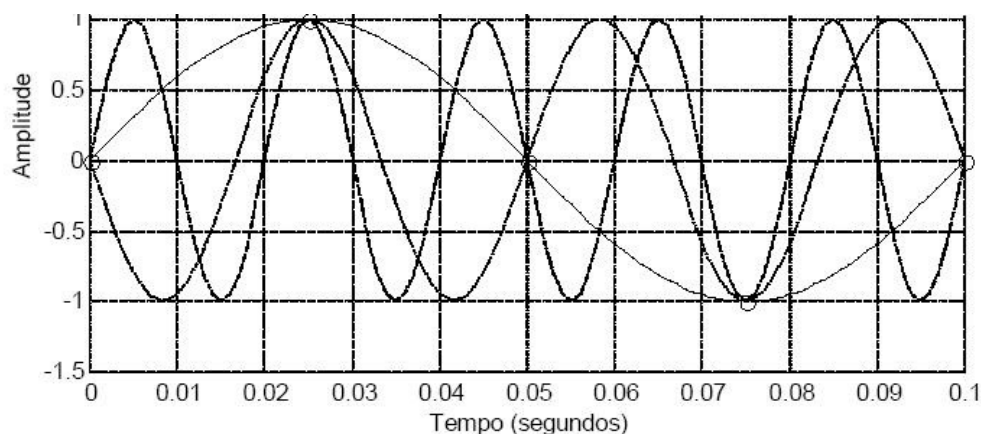


Figura 4. Vários possíveis sinais passando pelo mesmo conjunto de pontos [1].

Desta forma, verifica-se que:

- Algumas frequências de amostragem distorcem o sinal, isto é, o sinal original é perdido.
- A frequência de amostragem a ser utilizada para que não ocorra distorção do sinal depende da frequência do sinal
- A frequência de amostragem para que não ocorra distorção do sinal deve ser maior do que duas vezes a frequência do sinal.

A frequência  $\frac{f_a}{2}$  é denominada frequência de Nyquist, e comprova-se que qualquer sinal cuja maior frequência seja inferior à frequência de Nyquist pode ser aquisitado sem perdas nem distorções por uma frequência  $f_a$ . Caso esta constatação seja desrespeitada, poderá ocorrer o fenômeno de *aliasing*, que consiste no aparecimento de frequências não realmente presentes no sinal original [1].

A Figura 5 apresenta o espectro de frequências obtido com frequência superior a duas vezes a frequência de Nyquist. Verifica-se que não há sobreposição, de forma a manter apenas as frequências originais do sinal.

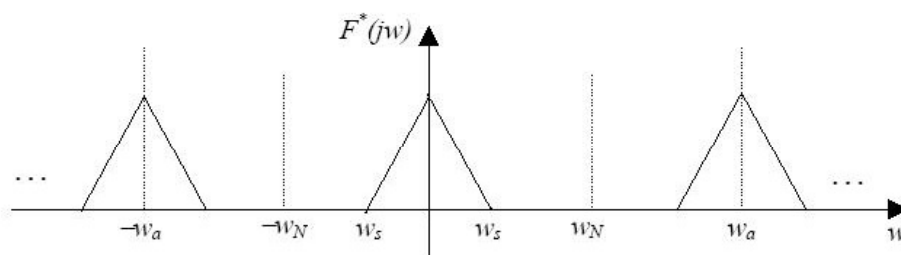


Figura 5. Espectro de frequência obtido de forma a respeitar o critério de Nyquist [1].

Já a Figura 6 demonstra o efeito nocivo do *aliasing*, não permitindo a posterior restauração do sinal original.

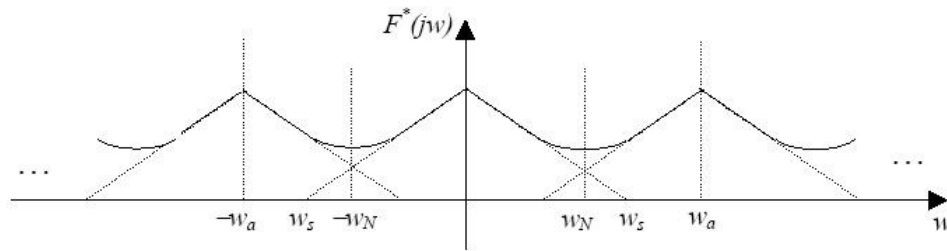


Figura 6. Formação de aliasing causado pela sobreposição de freqüências [1].

Pode-se concluir, portanto, a grande necessidade de se conhecer a ordem de grandeza da maior freqüência presente no fenômeno a ser estudado, para que seja possível tomar o devido cuidado ao escolher a freqüência de amostragem correta.

## 2.7 Extensometria

Extensômetros (*strain gage*) são sensores utilizados para a medição de deformação em superfícies. São resistências elétricas cuja deformação da estrutura onde estão fixados acompanha uma variação proporcional no valor dessa resistência. Esses sensores têm utilidade tanto para a análise da tensão em máquinas e estruturas, quanto como transdutores para medição de força, pressão, torque, deslocamento, entre outras aplicações [29].

O extensômetro tem como princípio de funcionamento a variação do seu valor de resistência elétrica conforme a sua malha resistiva é alongada ou comprimida. Quando a superfície na qual está fixado sujeita-se a tração, ocorre o alongamento com conseqüente aumento de resistência e quando a superfície sofre compressão, a resistência diminui. Este comportamento é explicado pela Equação 1, tendo como base a Figura 7:

$$R = \rho \cdot L / A \quad (\text{equação 1})$$

onde R: resistência, em ôhms

L: comprimento do fio condutor, em m

A: área da seção transversal do condutor, em m<sup>2</sup>

$\rho$ : resistividade do material condutor, em ohms\* m<sup>2</sup> / m

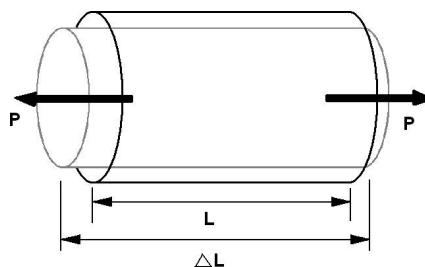


Figura 7. Esquema mostrando variação de comprimento com uma força P [29].

Mostra-se por diferenciação da Equação 1 e rearranjo matemático [29] (que não é o escopo desse trabalho) que:

$$dR/R = d\rho/\rho + (dL/L) \cdot (1 + 2 \cdot \nu) \quad (\text{equação 2})$$

onde  $\nu$ : coeficiente de Poisson do metal usado como condutor.

Determina-se que a variação da resistência é diretamente proporcional à variação do comprimento, já que o coeficiente de Poisson e a resistividade do material são constantes [29].

A sensibilidade (*gage factor*) à deformação é o termo usado para caracterizar a variação da resistência de um condutor em relação à variação do seu comprimento, sendo definida por “S”, conforme a Equação 3 [29]:

$$S = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = (1 + 2 \cdot \nu) + \frac{d\rho/\rho}{dL/L} \quad (\text{equação 3})$$

Portanto, a sensibilidade é definida por dois fatores: a variação das dimensões do condutor (L), da área ( $2\nu$ ) e da variação da resistência específica ( $d\rho/\rho$ ).

O eixo principal de um extensômetro é a direção na qual o medidor é mais sensível à deformação, isto é, a direção na qual a variação de resistência para uma determinada deformação é maior. Recomenda-se utilizar o extensômetro de modo que o seu eixo principal esteja alinhado com o campo de tensões, de modo a conseguir melhor uso do sensor como é apresentado na Figura 8.

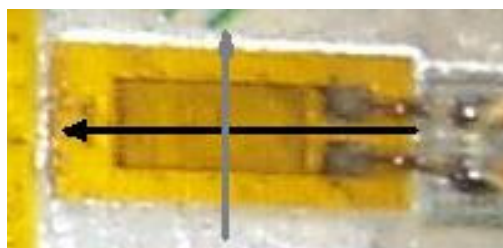


Figura 8. Esquema dos eixos principal do extensômetro (eixo preto) e transversal (eixo cinza).

## 2.8 Ponte de Wheatstone

Extensômetros arranjados em Ponte de Wheatstone têm seu esquema apresentado na Figura 9. Esse arranjo mede com grande precisão as pequenas variações no valor das resistências que causam uma diferença de potencial na saída da ponte, desequilibrada pela atuação dos extensômetros [29].

O circuito apresentado na Figura 9 é utilizado para medir as variações de resistência através da variação da tensão.

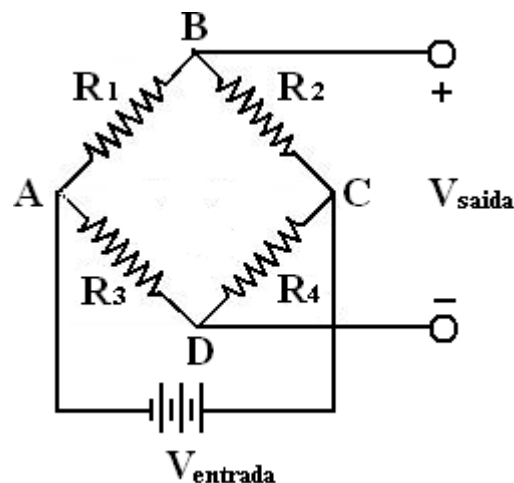


Figura 9. Circuito da Ponte de Wheatstone com resistores [29].

Inicialmente, se a ponte está balanceada, ao aplicar-se uma voltagem entre os pontos A e C (entrada), não será registrada diferença de potencial entre os pontos B e D (saída). Entretanto, mudanças no valor das resistências irão afetar a saída da ponte, e a voltagem de saída será proporcional a essa alteração.

Para exemplificar o fenômeno, pode-se trocar a resistência fixa  $R_1$  da Figura 9 por uma resistência variável [29]. A voltagem  $V_{AB}$  relativa à resistência  $R_1$  é dada por:

$$V_{ab} = R_1 / (R_1 + R_2) \cdot V_e \quad (\text{equação 4})$$

De maneira similar, tem-se que a queda de voltagem em R4 é dada por

$$V_{ad} = R_4 / (R_3 + R_4) \cdot V_e \quad (\text{equação 5})$$

A voltagem de saída, então, pode ser determinada pela voltagem entre os pontos B e D,  $V_{bd}$ , que é dada por:

$$V_{saida} = V_{bd} = V_{ab} - V_{ad} \quad (\text{equação 6})$$

Substituindo a Equação 3 e Equação 4 na Equação 5 e ordenando os termos obtemos:

$$V_{saida} = R_1 / (R_1 + R_2) \cdot V_e - R_4 / (R_3 + R_4) \cdot V_e$$

$$V_{saida} = (R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4) / (R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4) \quad (\text{equação 7})$$

Qualquer mudança no valor da resistência R1 altera o equilíbrio da ponte, conforme mostra a Equação 8.

$$V_{saida} = V_e \cdot ((R_1 + \Delta R_1) \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4) / ((R_1 + \Delta R_1) + R_2) \cdot (R_3 + R_4) \quad (\text{equação 8})$$



## 2.9 Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos é uma abordagem numérica através da qual pode-se analisar problemas complexos, sendo que os métodos analíticos fundamentados no cálculo diferencial e integral ou exigiriam muito esforço na busca das soluções exatas ou simplesmente não as encontrariam [30].

O método consiste em dividir o problema (objeto analisado) em muitas partes finitas, consistindo a discretização em elementos finitos [30]. Esta abordagem difere, portanto, do cálculo diferencial e integral, uma vez que estes se utilizam elementos infinitesimais, conforme mostrado na Figura 10:

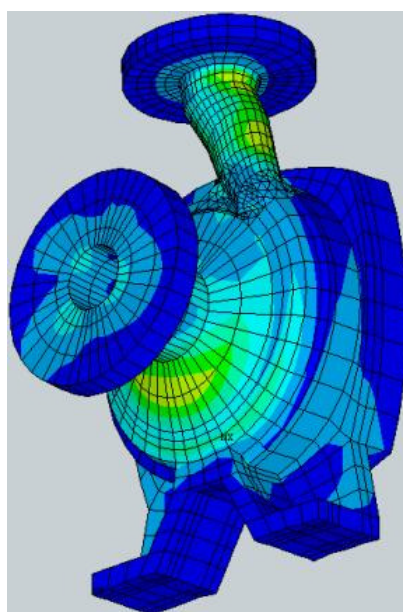


Figura 10. Exemplo de simulação computacional feita através do método dos elementos finitos [31].

Existem vários tipos de elementos infinitesimais, ou elementos finitos, com o qual o método pode trabalhar para a execução da análise. O tipo do elemento dependerá dos graus de liberdade nos nós, ou seja, da definição das direções livres nos vértices dos elementos [30]. Desta forma, cada direção livre ou rotação desimpedida em um nó equivale a um grau de liberdade.

Todo programa que apresente a abordagem através do Método dos Elementos Finitos deve apresentar cinco aspectos básicos [32]: a entrada de dados, superposição das matrizes e vetores do elemento, imposição de condições de contorno, a solução de equações e a saída de resultados.

Deve-se considerar que o Método dos Elementos Finitos apresenta uma relação de compromisso entre o número de nós/precisão e custo computacional. Quanto mais detalhada for uma malha, maior a proximidade com o resultado esperado na prática, porém mais oneroso será seu processamento.

### 3 Materiais, Equipamentos e Métodos

#### 3.1 Materiais

O novo dispositivo para obtenção dos esforços de usinagem teve seus componentes metálicos construídos em aço AISI 4140. Esse material foi adotado por apresentar um valor elevado de tensão de escoamento, sempre acima de  $400 \text{ N/mm}^2$ , de modo a permitir a medição de forças de grandes magnitudes (1000 N, aproximadamente). As propriedades do aço 4140 encontram-se na tabela (Tabela 1) abaixo:

Tabela 1. Propriedades mecânicas do aço AISI 4140 [33].

<b>Propriedades Mecânicas</b>	
<b>Densidade</b>	<b>7850 kg/m<sup>3</sup></b>
<b>Dureza Brinell</b>	<b>197</b>
<b>Módulo de Young</b>	<b>205 GPa</b>
<b>Coefficiente de Poisson</b>	<b>0,29</b>
<b>Tensão de Escoamento</b>	<b>435 MPa</b>
<b>Tensão Última</b>	<b>670 MPa</b>

Seu módulo de elasticidade assemelha-se aos valores encontrados para a maioria dos aços para construção mecânica, em torno de 210 GPa. Tal valor foi levado em conta para a análise da máxima deformação prevista para ocorrer no dispositivo e conciliá-la com a deformação suportada pelos extensômetros utilizados.

Os extensômetros (*strain gages*) fixados ao sistema são produzidos pela empresa KYOWA, do tipo KFG-5-120-C1-11, lote Y31655. Apresentam resistência nominal de 120 Ohms, possuindo um *gage factor* (GF) de 2,11. Seu comprimento no sentido mais sensível à deformação é de 10 mm, e transversalmente mede cerca de 3 mm.

O adesivo utilizado na união entre os extensômetros e o metal foi LOCTITE 496, IDC 268696, apresentado em embalagem plástica com bico dosador. Como o adesivo anteriormente mencionado necessita ser armazenado em baixas temperaturas, foi mantido sob refrigeração durante os intervalos entre as aplicações.

Os fios responsáveis pela transmissão dos sinais provenientes da saída dos extensômetros continham quatro pares blindados e trançados (PEKON MANGA 26 AWG), de modo a oferecer uma maior proteção contra interferências externas (blindagem) e internas (tranças). As soldas foram efetuadas com fio de estanho operando na temperatura especificada (em torno de 200 °C), temperatura esta obtida por meio de uma estação de solda com controle interno analógico de temperatura.

### **3.2 Equipamentos**

O dinamômetro utilizado foi o modelo digital portátil DD-300 fabricado pela INTRUTHERM. Apresenta como características a possibilidade de medir forças de tração e compressão, capacidade de carga de até 100 Kg, controle de zero (função “tara”), interface serial RS232 e alimentação de 9V. Uma imagem do dinamômetro é exibida abaixo (Figura 11):



Figura 11. Dinamômetro digital utilizado na etapa de calibração.

Foi utilizado um torno universal ROMI S-30 (10 HP de potência) do Laboratório de Máquinas Operatrizes do Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos da EPUSP para a realização dos ensaios comparativos.

O Sistema de Aquisição (placa de aquisição de dados e módulos com filtros e amplificadores) modelo ADS-2000 é produzido pela Lynx Eletrônica Ltda, juntamente com os softwares AqDados e AqAnalysis, e foi utilizado com uma taxa de aquisição de 5000 Hz.

### 3.3 Métodos

O dispositivo apresentado neste projeto foi baseado no trabalho de Yaldiz [34]. Foram feitas alterações em função da disponibilidade de materiais e equipamentos conforme é apresentado neste item.

A parte metálica do dispositivo é constituída de duas placas de aço, ligadas entre si através de quatro anéis exteriormente octavados, também de aço, conforme mostra a figuras abaixo (Figura 12):

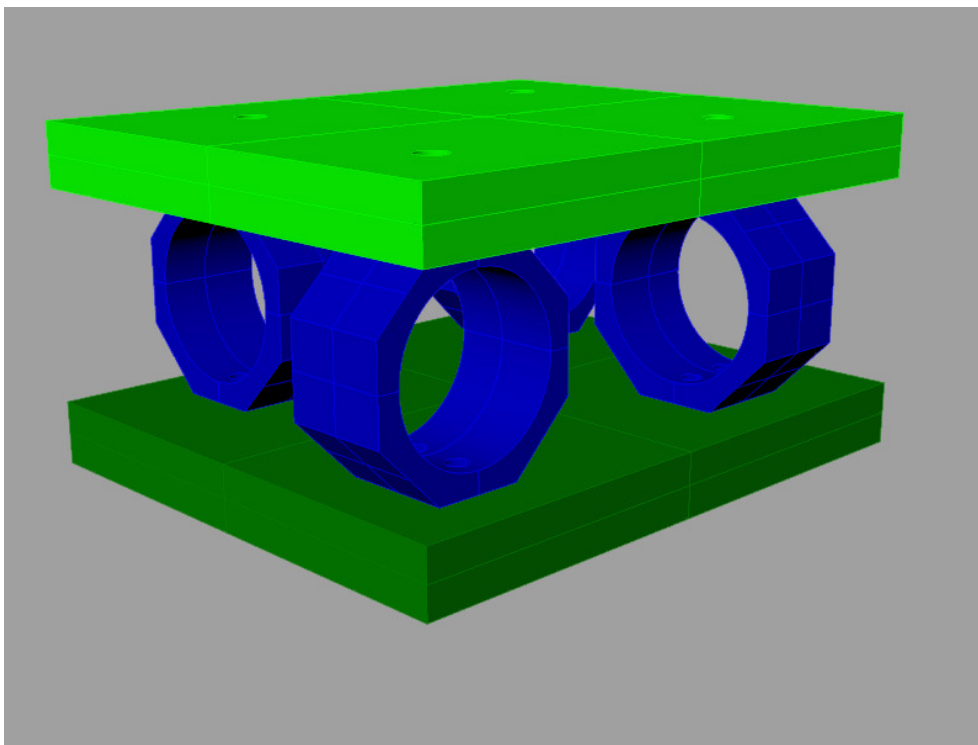


Figura 12. Modelo em CAD do dispositivo projetado mostrando a placa superior, a placa inferior e os quatro anéis octavados

As placas de aço foram cortadas utilizando serra e depois foram usinadas com o auxílio de uma fresadora, de modo a obter o paralelismo entre as faces e bom acabamento superficial. Ambas as placas apresentam comprimento de 120 mm, largura de 100 mm e espessura de 10 mm.

Em uma das placas (placa superior) foram feitos quatro furos passantes com 6,5 mm de diâmetro, de modo a fixar por pressão uma das faces externas dos anéis octavados com a placa através de parafusos M6. Como os diâmetros dos furos passantes são superiores aos apresentados pelos parafusos M6, é possível obter uma pequena margem para acomodação do sistema, fundamental para a montagem final. As dimensões desta placa assim como a disposição dos furos encontram-se abaixo (Figura 13), a seguir:

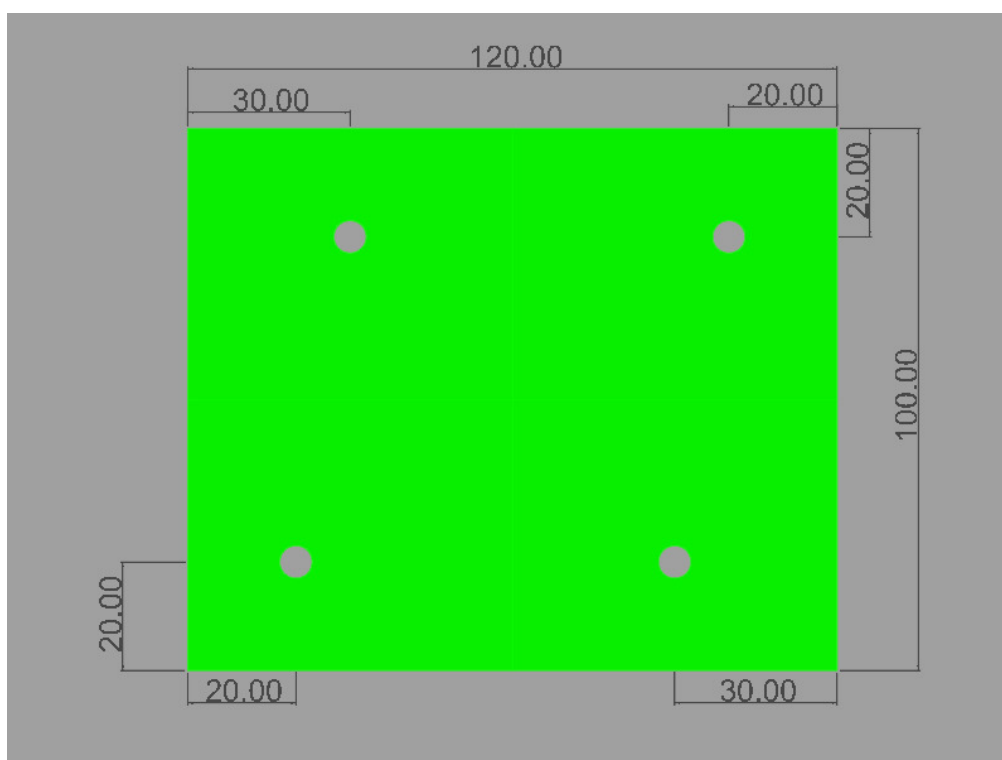


Figura 13. Placa superior com as relativas dimensões e posições dos furos passantes de 6,5 mm.

A segunda placa (placa inferior) apresenta o mesmo dimensionamento no tocante a comprimento, largura e espessura, porém ao invés de quatro furos passantes apresenta oito furos com rosca M5. Através destes é feita a fixação por parafusos da placa junto aos anéis, uma vez que cada um destes apresenta dois furos com rosca M5. Insere-se aqui uma ilustração (Figura 14) desta segunda placa:

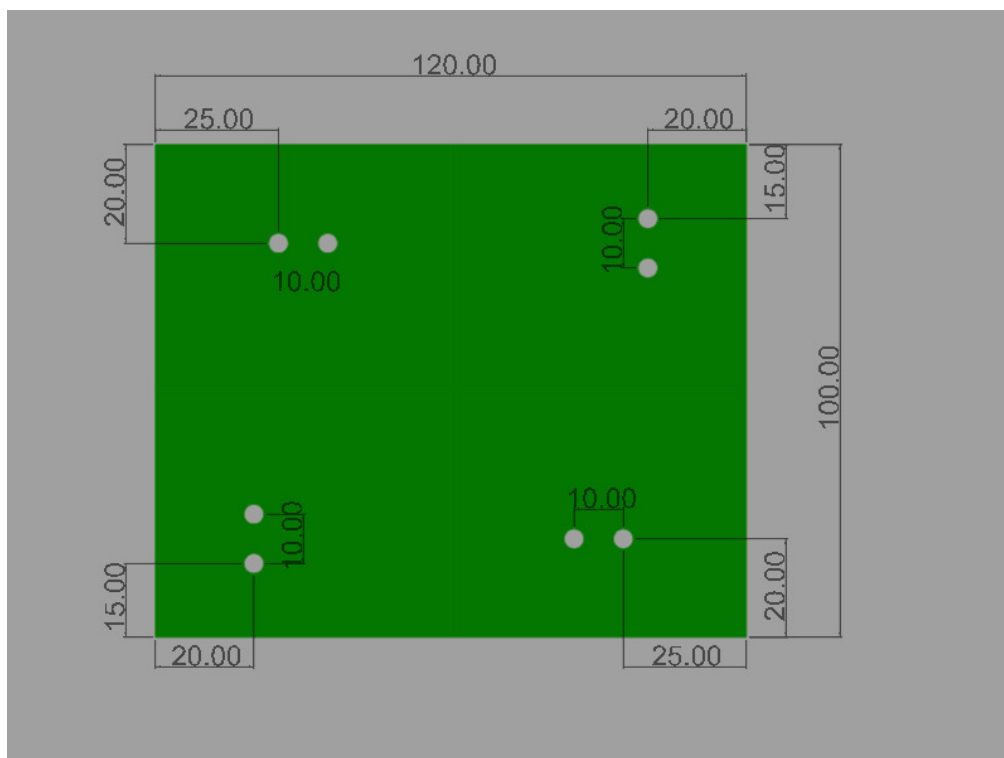


Figura 14. Placa inferior do dispositivo com as relativas dimensões e posições dos oito furos roscados de 5 mm.

Todos os furos foram feitos através de marcações nas placas, de modo a garantir o perfeito acoplamento das placas com os quatro anéis centrais. As roscas foram criadas com machos de padrão métrico (M6 e M5), e os parafusos foram comprados de acordo com este padrão.

Os anéis centrais foram obtidos a partir de um cilindro do aço AISI 4140. Inicialmente o cilindro foi fresado de forma a apresentar o exterior octavado. A seguir foi feito o furo interno, com 32 mm de diâmetro e depois se procedeu ao corte do cilindro em quatro anéis com 20 mm de largura. A menor espessura encontrada em cada um dos anéis é de 4 mm, ocorrendo na reta normal ao centro de cada face externa. Através desta espessura pode ser verificado se cada anel octavado suportaria a tensão a ele imposta. Inicia-se pelo cálculo da deformação, seguindo as equações encontradas em Shaw [10]:

$$\varepsilon_t = \frac{\pm 1,09 \cdot F_t \cdot r}{E \cdot b \cdot t^2} = 2,6 \cdot 10^{-4} \quad (\text{equação 9})$$



$$\varepsilon_t = \frac{\pm 2,18 \cdot F_c \cdot r}{E \cdot b \cdot t^2} = 0,52 \cdot 10^{-4} \quad (\text{equação 10})$$

Foram utilizadas magnitudes máximas de 1000 N para cada componente da força de corte,  $F_c$  e  $F_t$ . Os outros parâmetros são:  $b = 20\text{mm}$ ,  $r = 16\text{mm}$ ,  $t = 4\text{mm}$ ,  $E = 210000 \text{ N/mm}^2$ .

De posse da deformação, foi possível calcular as tensões resultantes [34]:

$$\sigma_t = E \cdot \varepsilon_t = 54,5 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{equação 11})$$

$$\sigma_c = E \cdot \varepsilon_c = 109,0 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{equação 12})$$

Dado que a tensão de escoamento do aço AISI4140 é da ordem de 450 N/mm<sup>2</sup>, verifica-se que os anéis suportarão os esforços com um bom coeficiente de segurança (~4,1).

De posse dos quatro anéis octogonais, iniciou-se a etapa de furação. Em cada anel foram feitos dois furos com roscas M5 na parte inferior, apresentando distância entre-centros de 10 mm. Foi também feito um furo com rosca M6 no centro da face superior de cada anel. Assim, os anéis em sua configuração final apresentam-se na seguinte forma, abaixo ilustrada (Figura 15):

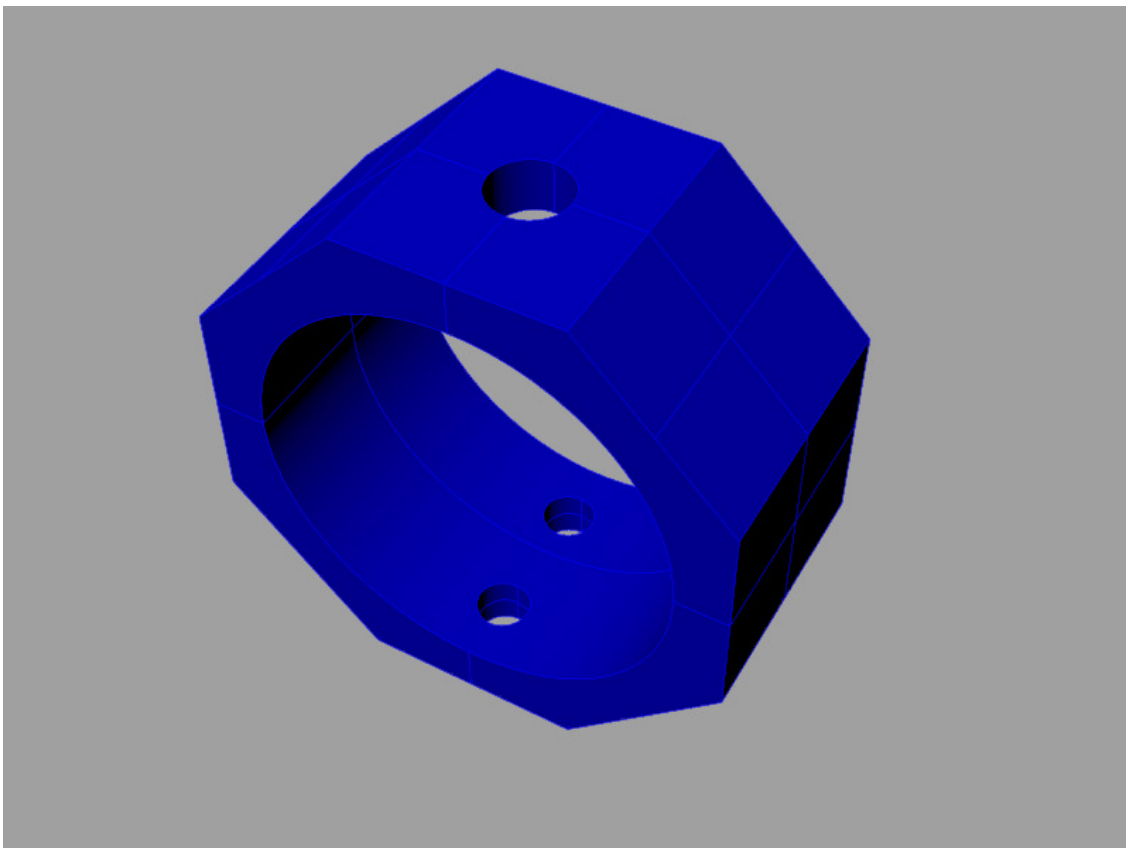


Figura 15. Modelo em CAD de um dos anéis octogonais, mostrando a disposição dos furos tanto na parte superior quanto na inferior.

De posse do modelo matemático de cada anel foi realizado um estudo utilizando o método dos elementos finitos para a verificação dos locais ótimos para a instalação dos extensômetros (Figuras 16, 17 e 18):

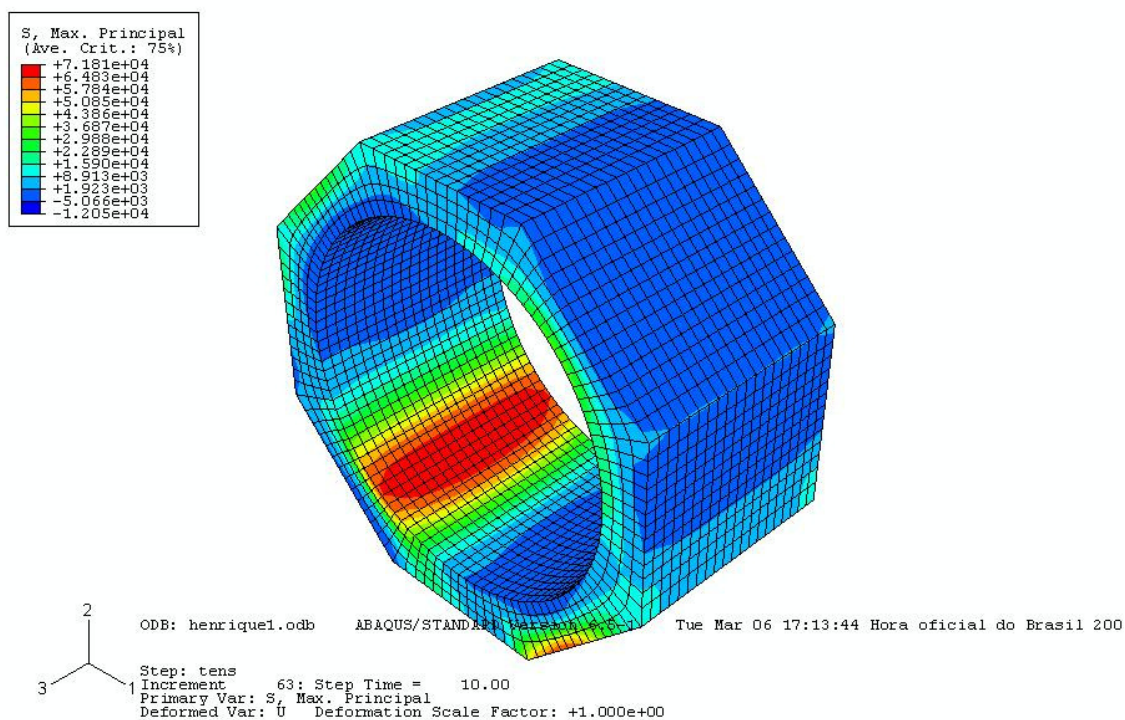


Figura 16. Método dos elementos finitos mostrando a distribuição de tensões no anel octogonal. Regiões azul-escuro apresentam tensão negativa, enquanto regiões verdes apresentam tensão positiva.

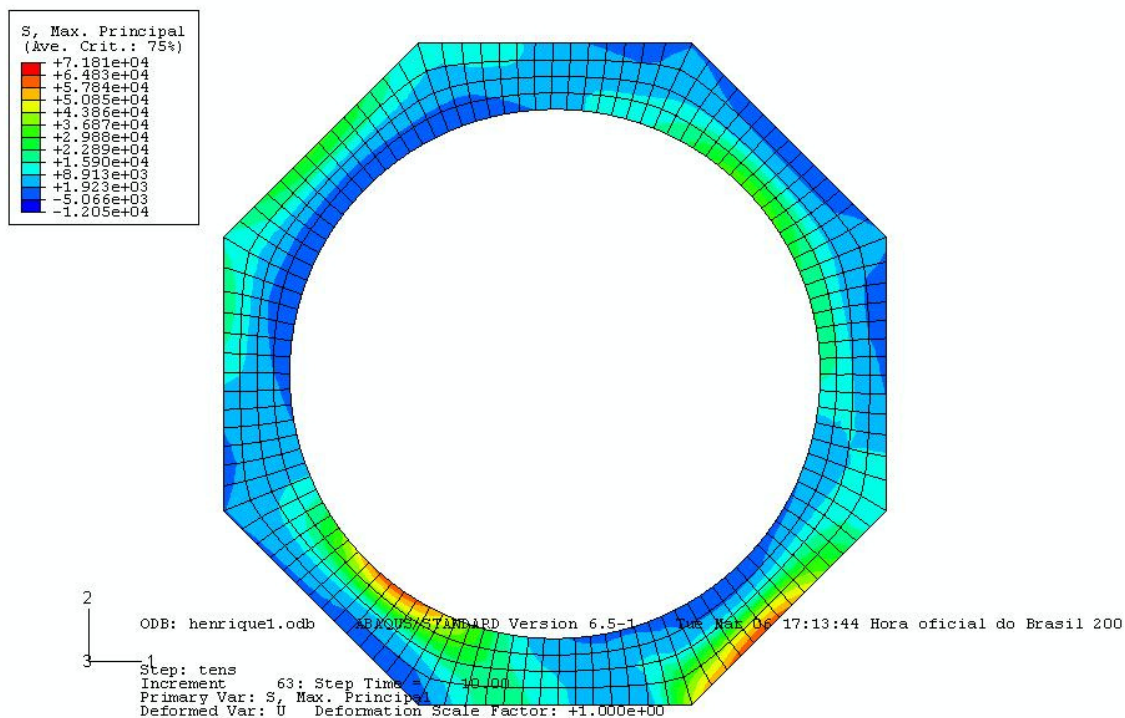


Figura 17. Outra vista mostrando a oposição de tensões (tração e compressão) nas faces onde estão afixados os extensômetros.

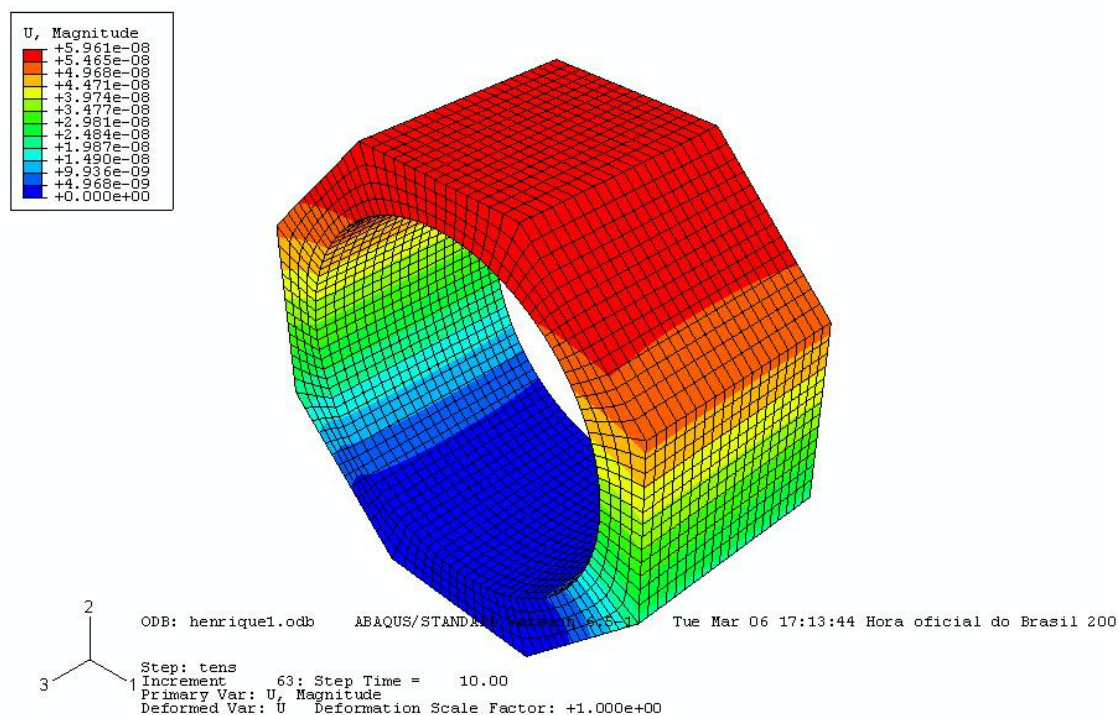


Figura 18. Estudo com o método dos elementos finitos mostrando o deslocamento de cada parte do anel octogonal. Regiões vermelhas significam maior deslocamento, e regiões azul-escuro, menor deslocamento.

De acordo com o resultado do estudo em elementos finitos, os extensômetros foram instalados nas faces adjacentes àquelas que receberam o furo central com rosca M6, de forma a constituir uma meia ponte de Wheatstone conforme a ilustração (Figura 19):

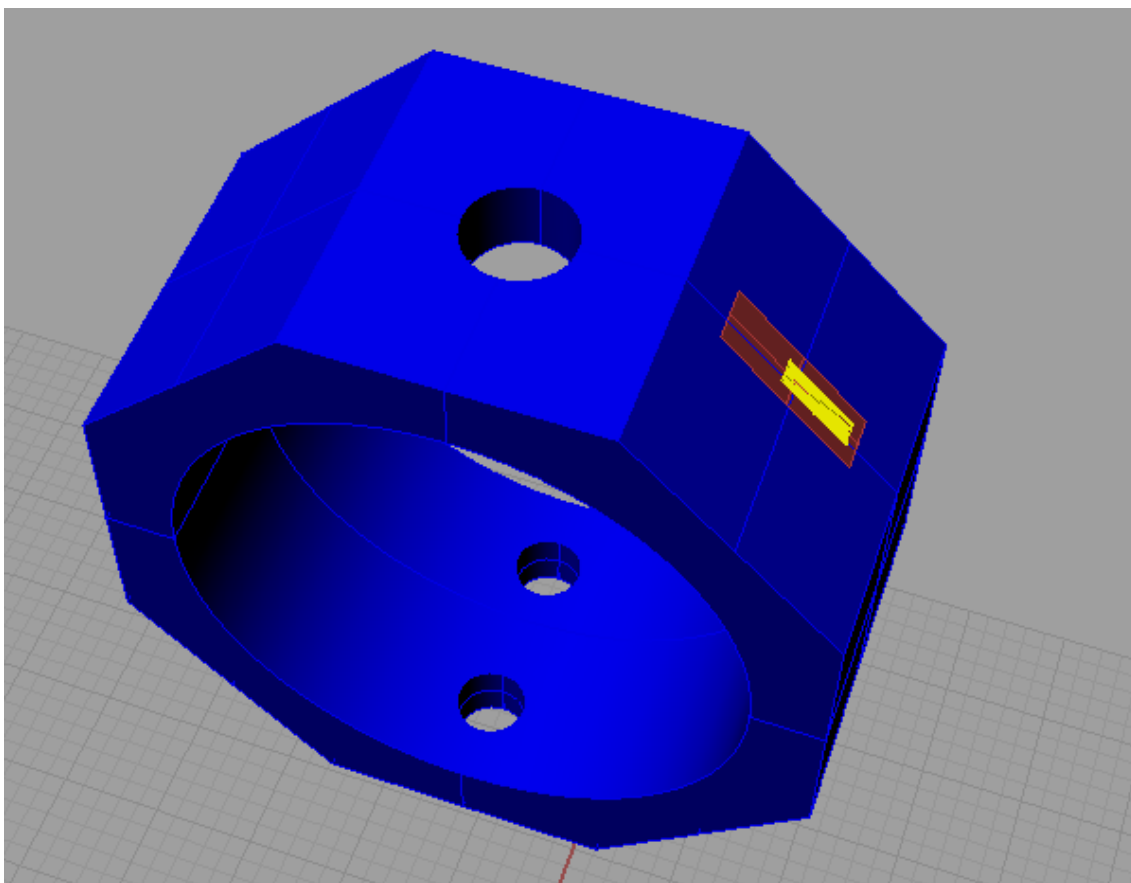


Figura 19. Disposição do extensômetro na face adjacentes àquela com o furo central.

Percebe-se que através da distribuição de tensões apresentada nas Figuras 16 e 17 e do arranjo utilizado para os extensômetros que os efeitos de tração e compressão tendem a somar-se, tornando o sistema muito mais sensível a esforços. Devido a este arranjo, quando uma das faces adjacentes ao furo roscado superior encontra-se em compressão, a outra face sofre tração.

Desta forma, pode-se notar que foram necessários quatro extensômetros, um em cada anel octogonal. Para a colagem dos mesmos foi realizada uma limpeza com álcool e algodão nas faces previamente lixadas, para evitar a contaminação por impurezas.

O local intencionado para a colagem foi demarcado com riscador, e uma gota do adesivo acima especificado foi utilizada para cada extensômetro. Pressionou-se o strain gage de encontro à face metálica por aproximadamente

um minuto, utilizando-se para tanto de uma fita plástica provida juntamente com a embalagem de extensômetros.

Uma vez concluída a colagem dos extensômetros, os mesmos foram cobertos com fita isolante para prevenir qualquer contato ou avaria. Pode-se então iniciar a etapa de soldagem, onde cada grupo de dois extensômetros foi arranjado como uma meia ponte de Wheatstone.

Como cada conjunto de dois anéis encontra-se transversalmente posicionado em relação ao outro conjunto, é possível obter a medição de esforços através da decomposição destes nos dois sentidos de orientação dos conjuntos sem o acarretamento de grandes deformações (Figura 18), devido ao aumento de rigidez do sistema. Para o dispositivo em questão, um conjunto fornece a força de corte ( $F_c$ ) enquanto o outro conjunto fornece a força de avanço ( $F_a$ ).



## 4 Resultados e Discussões

### 4.1 Construção do Dispositivo

O dispositivo foi construído de acordo com o projetado, e pode ser visualizado através da imagem a seguir (Figura 20):

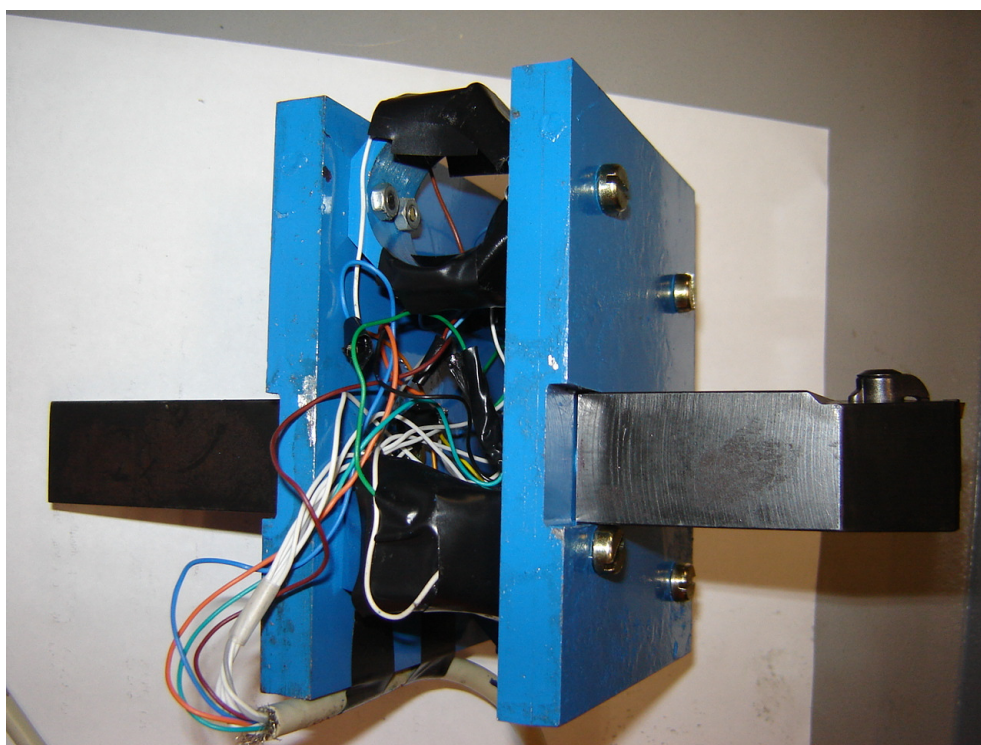


Figura 20. Foto do dispositivo construído, já com todos os componentes fixados.

Após a confecção das placas ambas foram pintadas no intuito de protegê-las contra efeitos de corrosão, visto que o aço empregado é suscetível a este tipo de fenômeno.

Similarmente às chapas de aço, os anéis também foram pintados ao término de sua manufatura, porém as faces onde seriam instalados os extensômetros não receberam pintura, e sim um acabamento mais apurado feito através de lixadora. Procedeu-se assim para melhorar a aderência dos

extensômetros com a face metálica, diminuindo a rugosidade superficial da mesma.

A extremidade de um porta-ferramentas para pastilha triangular de corte ortogonal foi acoplada ao dispositivo, através de um chanfro realizado com fresa (largura de corte de 25 mm) e de fixação por parafusos M5, conforme mostra a Figura 21:

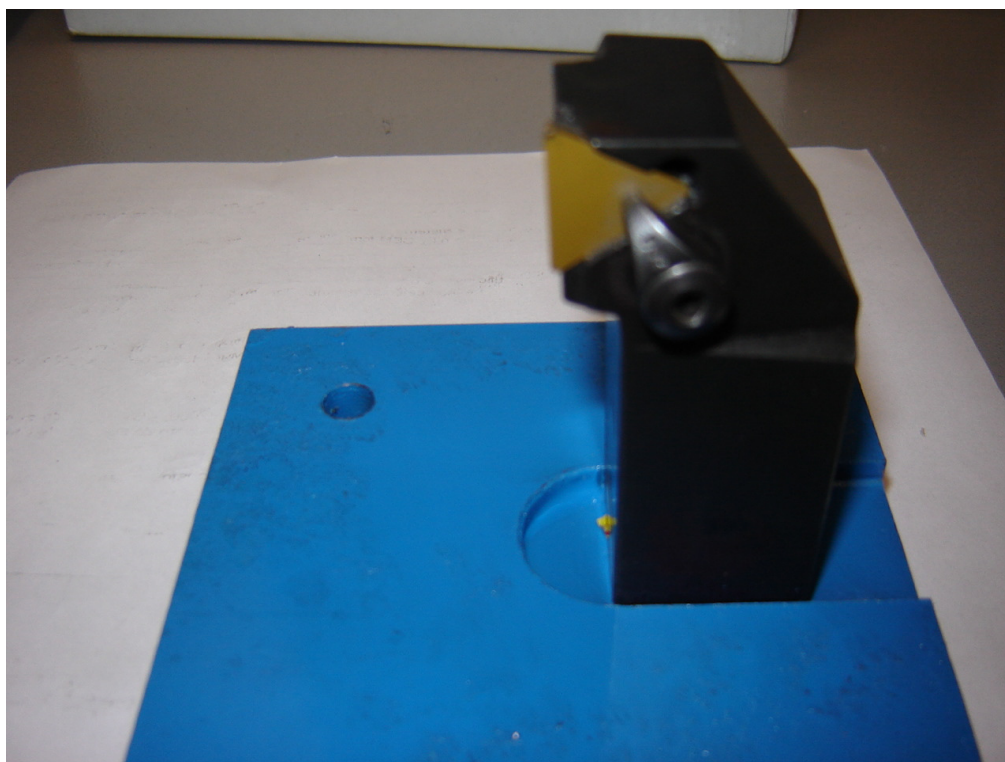


Figura 21. Dispositivo com a ponta do porta-ferramentas já acoplada.

Na parte posterior do dispositivo foi afixada a haste restante do porta-ferramentas utilizado, de modo que o sistema possa ser preso a um torno da forma usual (Figura 22).



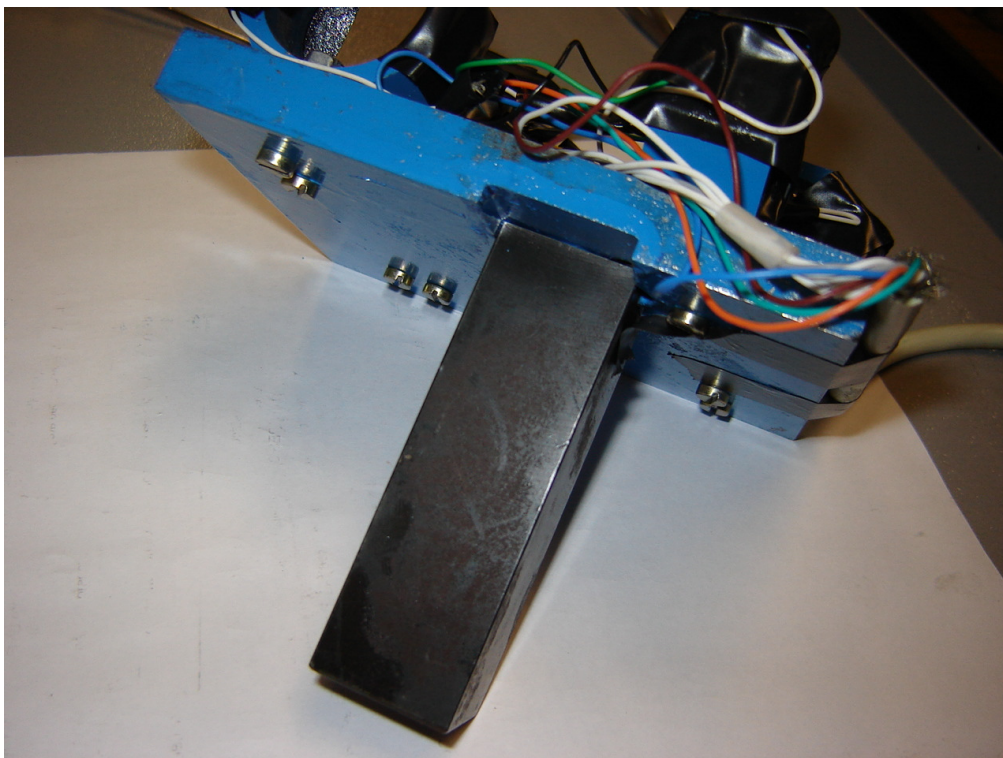


Figura 22. Dispositivo com a haste posterior fixada por meio de parafusos.

Foram também providenciados suportes no intuito de manter fixo o cabo que leva os sinais até o sistema de aquisição. Isto foi feito utilizando-se duas chapas metálicas fixadas por parafuso, conforme ilustração abaixo (Figura 23):

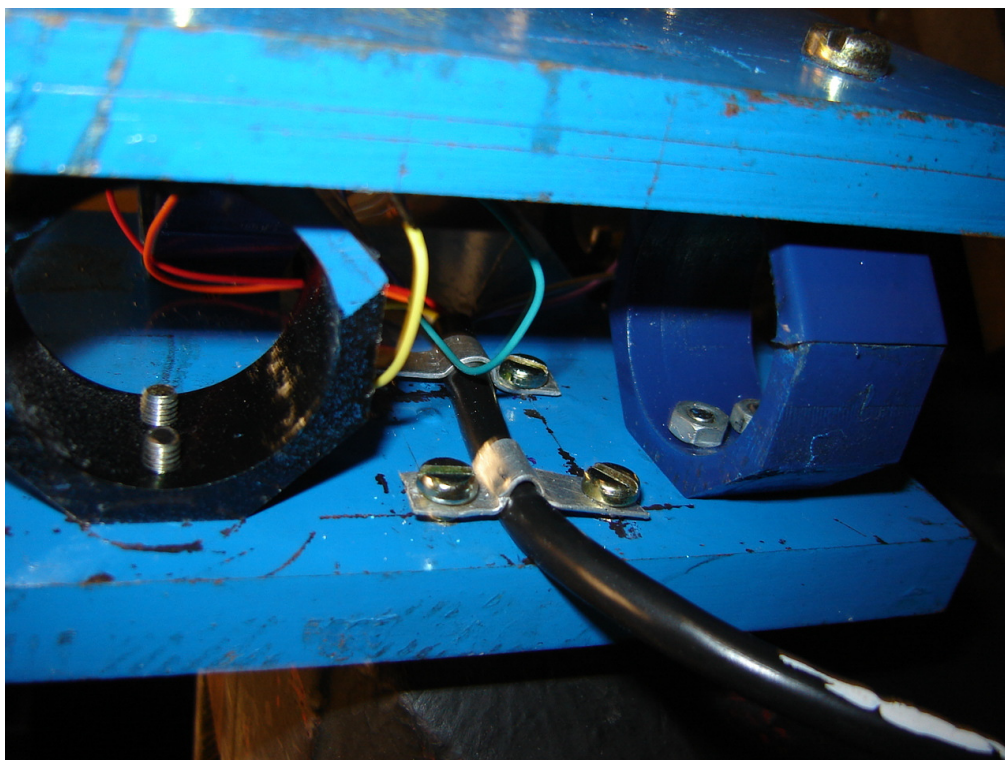


Figura 23. Fixação do cabo na placa inferior do dispositivo.

Já com o dispositivo soldado, pôde-se levar os terminais do cabo blindado para o sistema de aquisição, instalando-o nos dois terminais de entrada do mesmo, sendo quatro fios para cada canal de entrada, e dar início à etapa de calibração.

A extensão do fio utilizado permite que o microcomputador responsável pela aquisição dos dados fique afastado da máquina responsável pela usinagem dos corpos de prova (torno), prevenindo assim interferências e acidentes, e a blindagem dos cabos mostrou-se suficiente para garantir a não-degradação do sinal por ruídos.

Também foi notada a necessidade de se isolar eletricamente o dispositivo do torno, em função da interferência elétrica presente no mesmo. Esta interferência prejudica a leitura dos extensômetros, fazendo com que mesmo em repouso a leitura de forças variasse de grande magnitude. Este isolamento foi realizado com adesivo isolante, de forma a evitar o contato entre partes metálicas.

## 4.2 Calibração

A calibração do dispositivo foi feita em bancada, prendendo a haste posterior a uma morsa e deixando a ponta do porta-ferramentas apoiada em um dinamômetro digital, conforme ilustrado abaixo (Figura 24):



Figura 24. Bancada e dinamômetros usados na calibração do dispositivo.

Através do programa AqDados, descrito anteriormente, foi feita a calibração para cada um dos canais separadamente. Iniciou-se fazendo o balanceamento da ponte para anular o efeito de qualquer variação de resistência devida a imperfeições de solda ou fiação. Este balanceamento é realizado via software, sendo mais uma funcionalidade do sistema de aquisição.



Instalou-se o dispositivo na entrada de fiação do sistema de aquisição respeitando a colocação de cada terminal dos extensômetros na sua respectiva posição, conforme ilustrado abaixo (Figura 25):

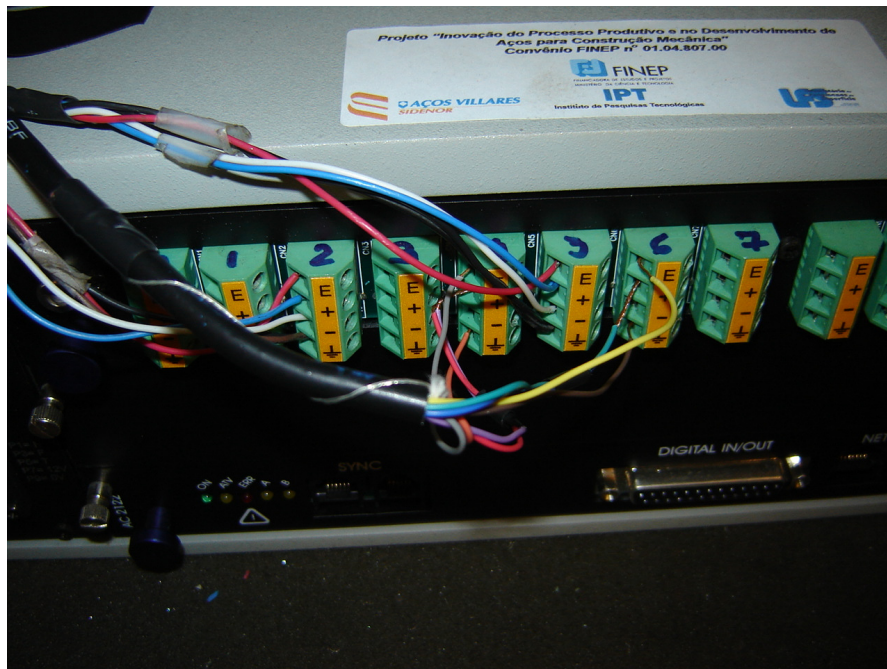


Figura 25. Terminais de entrada do sistema de aquisição.

A seguir, aplica-se uma carga conhecida na ponta do porta-ferramentas (verificada através do dinamômetro) e anota-se o valor correspondente de tensão de saída na ponte de Wheatstone.

Após a tomada de alguns pontos, pode-se verificar o ganho do sistema e a correlação entre os pontos utilizados. A Figura 26 abaixo ilustra este procedimento para a calibração do canal relativo à força de corte:

**Aferição por Regressão Linear**

Módulo: 0 AI-2161: - Unidade A

Cn Mod.: 0 ↑ Próximo ↓ Anterior

Canal: 6

Nome: F.Corte H

Unidade: N

Tipo: Linear

**Limites Especificados**

Inferior	Superior	
-10,0	10,0	V
-8719,382	8679,018	N

**Limites Calculados**

Inferior	Superior	
-10,0	10,0	V
-8712,757	8685,638	N

Ganho K: 0,001149531 V / N

Ganho 1/K: 869,9197 N / V

**Tabela de Calibração**

Valor no A/D: 0,1471 V

Valor Calculado: 114,4056 N

Valor Engenharia: 109,8 N

↕ Inserir ↕ Remover 📋 Copiar

	V	Val. Eng.
1	0,0262	0
2	0,0424	33
3	0,0769	49,8
4	0,0928	70,4
5	0,1077	84,6
6	0,1471	109,8

Correlação: 96,80 %

Aceita Limites Calculados Ganho 🚪 Sair ❌ Cancelar 🔍 Ajuda

Figura 26. Tela do AqDados mostrando o ajuste de canal por aquisição de pontos.

Pode-se verificar que o ganho do sistema foi de 869,92 Newtons por Volt (N/V) e a correlação encontrada entre os pontos utilizados foi de 96,8%. A calibração deste canal foi feita através da tomada de cinco pontos, com valor máximo de 110N devido a limitações do arranjo em bancada utilizado na calibração.

A seguir é apresentada a calibração do canal relativo à força de avanço (Figura 27), que apresentou ganho de 847,95 Newtons por Volt (N/V) e uma correlação de 98,72%.

**Aferição por Regressão Linear**

Módulo: 0.AI-2161: - Unidade A

Cn Mod.: 0 ↑ Próximo

Canal: 4 ↓ Anterior

Nome: F.Avanço H

Unidade: N

Tipo: Linear

**Limites Especificados**

Inferior	Superior	
-10,0	10,0	V
8439,913	-8519,112	N

**Limites Calculados**

Inferior	Superior	
-10,0	10,0	V
8470,875	-8488,153	N

Ganho K: -0,001179313 V / N

Ganho 1/K: -847,9514 N / V

**Tabela de Calibração**

Valor no A/D: -0,1392 V

Valor Calculado: 109,3957 N

Valor Engenharia: 103 N

+ Inserir - Remover 📋 Copiar

	V	Val. Eng.
1	-0,0140	0
2	-0,0439	29,2
3	-0,0720	52,2
4	-0,0925	74,2
5	-0,1071	87
6	-0,1392	103

Correlação: 98,72 %

Aceita Limites Calculados Ganho Sair Cancelar Ajuda

Figura 27. Calibração do canal da força de avanço no AqDados.

Durante a calibração foi elaborado um guia auxiliar, documentando detalhadamente cada um dos passos realizados. Este procedimento tem por objetivo permitir uma rápida e eficiente calibração por qualquer pessoa operando o dispositivo, de forma a permitir a continuidade do projeto e utilização do equipamento no futuro. O guia completo encontra-se no Anexo 1.

### 4.3 Ensaios Comparativos

Para efetuar os ensaios comparativos foi realizada a usinagem de um polímero PVC. Os parâmetros utilizados foram: avanço (f) de 0,357 mm/volta, rotação (n) de 710 rpm, profundidade de corte (d) de 6 mm no diâmetro e diâmetro inicial (Di) de 63,7 mm. O comprimento do corpo de prova foi de aproximadamente 150 mm.



Figura 28. PC operando o AqDados ao lado do torno.

Primeiramente foram usinados corpos-de-prova com o dispositivo já existente, cujos resultados são tomados como parâmetro para a comparação com o novo dispositivo construído. Desta forma é possível verificar a eficiência do dispositivo projetado.

A ferramenta utilizada nas duas séries de ensaios foi plana, de metal duro, tipo (TPNM 160304).

O gráfico de forças de corte e avanço obtidos com o primeiro dispositivo encontram-se abaixo (Figura 29):

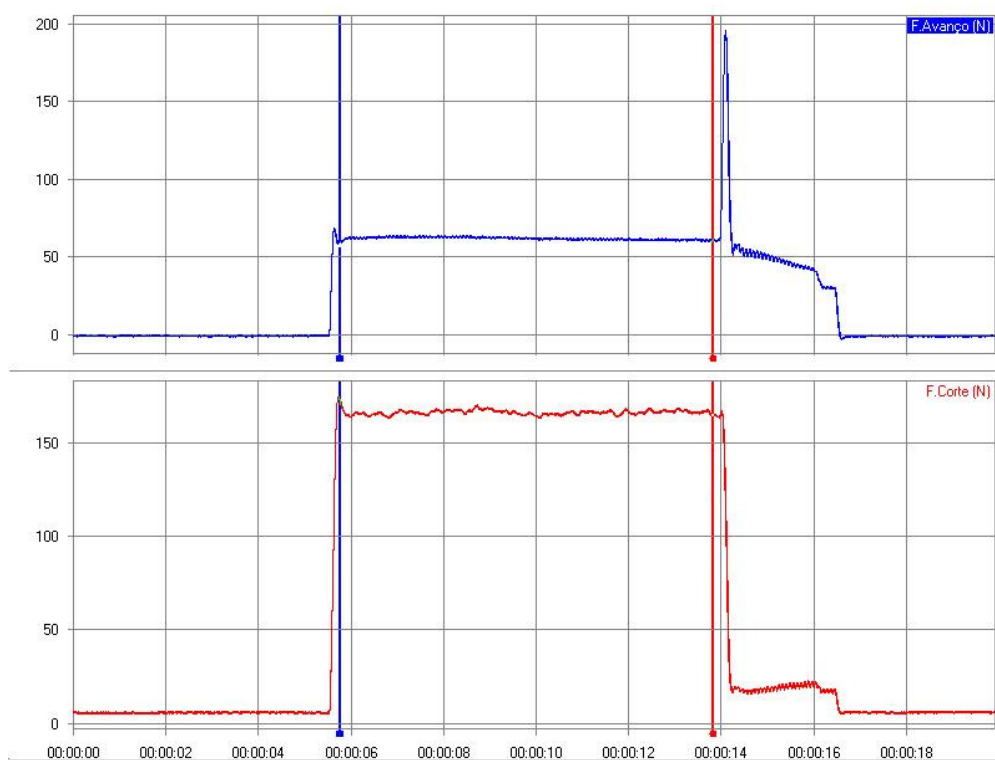


Figura 29. Força de Avanço (acima) e Força de Corte (abaixo) para o ensaio realizado com o dispositivo original.

Pode-se notar o baixo desvio obtido com este dispositivo. As retas verticais azul e vermelha representam respectivamente o trecho inicial e final do gráfico no qual será realizada a análise estatística dos resultados, utilizando o programa AqAnalysis. Esta análise fornece valores de forças médios, máximos, mínimos e desvio padrão, entre outros, conforme a tabela abaixo:



Tabela 2. Análise estatística do ensaio realizado com o primeiro dispositivo.

	F.Avanço	F.Corte
	(N)	(N)
Amostras	40305	40305
Máximo	63,8159	171,947
Mínimo	57,4752	162,925
Máx - Mín	6,34071	9,02171
Média	61,8208	165,987
Desvio Padrão	0,865705	1,14377
Área	498,204	1337,66
RMS	61,8261	165,988

Percebe-se que o valor médio foi de 61,82 N com desvio padrão de 0,86 N para a Força de Avanço e 165,99 N com desvio de 1,14 N para a Força de Corte. Estes baixos valores de desvio padrão são consequência da alta rigidez e alto ganho do dispositivo.

A seguir foi realizado o ensaio com o dispositivo projetado e construído, utilizando o mesmo material e parâmetros anteriores. Uma imagem deste dispositivo montado no torno se encontra abaixo (Figura 30):

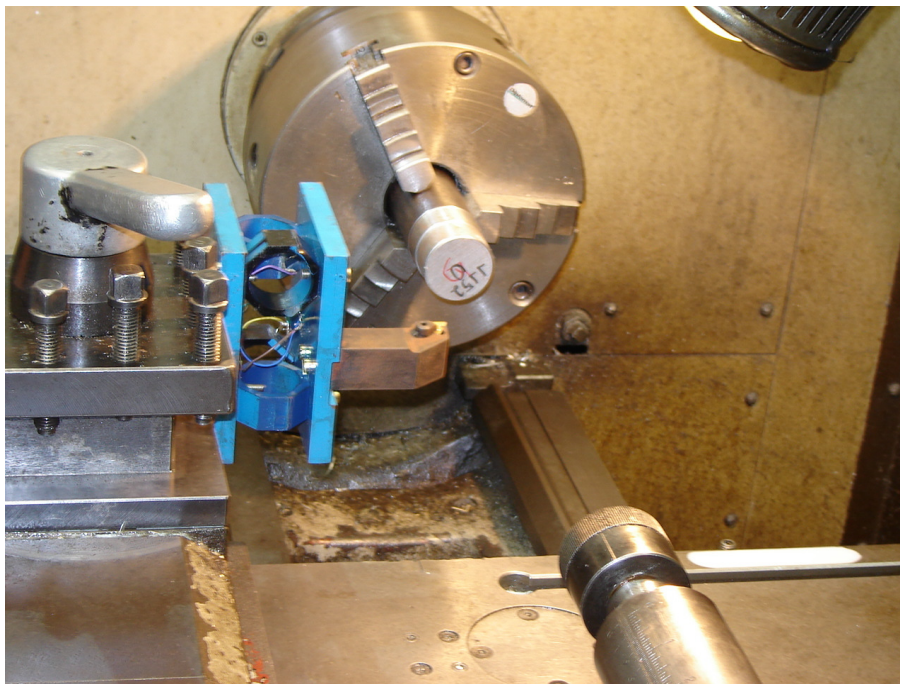


Figura 30. Dispositivo construído fixado ao torno durante o ensaio

Os gráficos obtidos durante este segundo ensaio encontram-se na próxima figura (Figura 31):

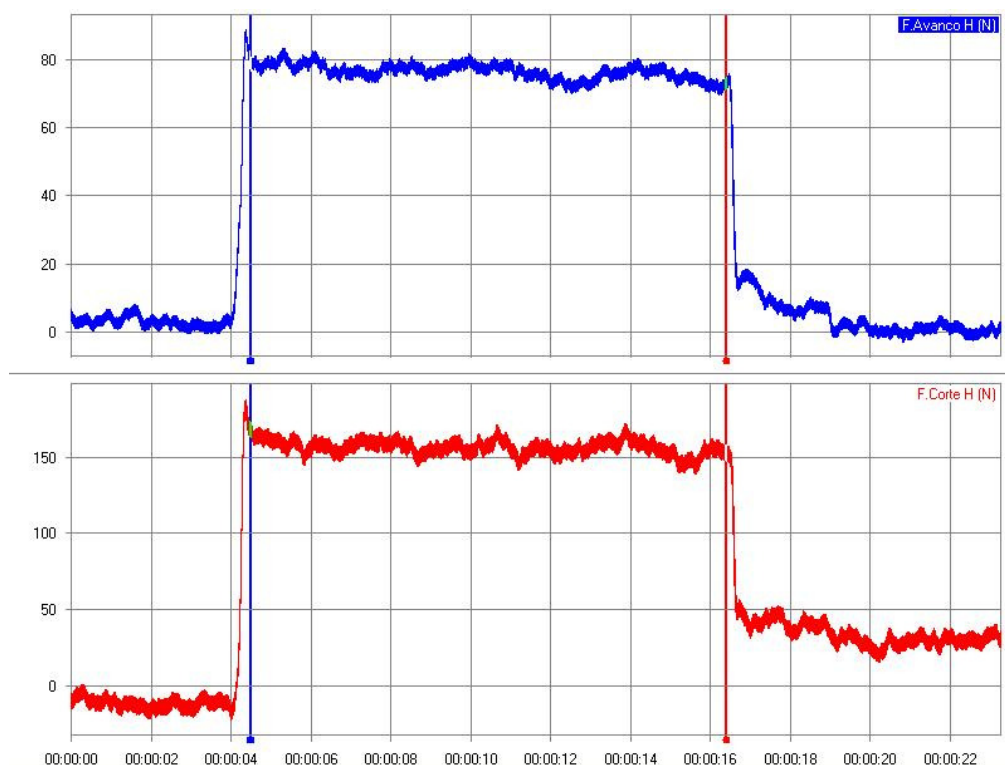


Figura 31. Força de Avanço (acima) e Força de Corte (abaixo) para o ensaio realizado com o dispositivo construído.

A análise estatística deste segundo ensaio encontra-se abaixo (Figura 31):

Tabela 3. Análise estatística do ensaio realizado com o dispositivo construído.

	F.Avanço H	F.Corte H
	(N)	(N)
Amostras	59510	59510
Máximo	83,2871	172,029
Mínimo	69,7009	139,11
Máx - Mín	13,5862	32,9193
Média	76,3154	156,495
Desvio Padrão	2,34909	5,31607
Área	908,069	1862,12
RMS	76,3509	156,584

Para o segundo ensaio temos a média de 156,50 N para a Força de Corte e 76,31N para a Força de Avanço. Constata-se também que os valores de desvio padrão são maiores com o dispositivo projetado.

O valor obtido com o dispositivo construído para a média da Força de Corte se encontra próximo (6% de discrepância) ao obtido com o dispositivo original. Já no caso da média da Força de Avanço houve um erro maior (da ordem de 20%). Possíveis causas para esta diferença são a mudança do aparato e método de calibração, gerando ganhos ligeiramente diferentes para cada dispositivo.

Em função do maior desvio padrão encontrado nos ensaios com o novo dispositivo, verifica-se necessário aumentar a rigidez do conjunto de modo a permitir que o porta-ferramentas vibre menos. Esta etapa consistirá em um reforço com solda entre o porta-ferramenta e as placas metálicas, a ser realizado em momento futuro.

## 5 Conclusões

O dispositivo construído mostrou-se consistente com o idealizado em projeto, cumprindo com a função de aquistar esforços de usinagem em dois sentidos diferentes (força de corte e força de avanço).

Verificou-se que ambos os canais confeccionados apresentam ganho da mesma ordem de grandeza e próximos (869,92 N/V para a força de corte e 847,95 N/V para a força de avanço), de modo que o dispositivo apresenta tanto a rigidez necessária para resistir aos esforços quanto sensibilidade de medição nos dois sentidos, apresentando-se equilibrado.

Através das correlações apresentadas (96,8% para o canal referente à força de corte e 98,7% para o canal referente à força de avanço) verifica-se a linearidade entre esforços aplicados e saídas da meia ponte de Wheatstone, condição necessária para a correta aquisição dos dados de interesse.

É necessário ressaltar a necessidade de recalibração após qualquer operação que exija a desmontagem do dispositivo. Isso ocorre devido ao aperto empregado na fixação entre as placas metálicas e os anéis octogonais. Porém, isto não é necessário para operações de troca de pastilha e montagem do sistema no equipamento de usinagem (torno).

## Referências Bibliográficas

1. Ogata, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Brasil. Prentice Hall. 3ª edição, 1998.
2. Diniz, A. E.; Marcondes, F. C.; Coppini, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. São Paulo. Editora Artliber. 2ª edição. 2000.
3. Kalpakjian, S. Schmid, S. R. **Manufacturing Engineering and Technology**. USA. Prentice Hall. 4ª edição. 2000.
4. Metals Handbook - Machining. USA. ASM, vol 16, 1989.
5. Peckener, D.; Bernstein, I.M. **Handbook of Stainless Steels**. USA. McGraw Hill, 1977. Cap. 24.
6. Reddy, R. G., DeVor, R. E., Kapoor, S. G. A mechanistic force model for combined axial-radial contour turning. **International Journal of Machine Tools & Manufacturing Design Research and Application**. vol. 41. pp. 1551-1572, 2001.
7. Axinte, D.A.; Belluco, H.; De Chiffre, L. Evaluation of cutting force uncertain components in turning. **International Journal of Machine Tools & Manufacturing**. Vol. 41, pp. 719-730, 2001.
8. Hou, Z. B.; Komanduri, R. Modeling of thermomechanical shear instability in machining. **International Journal of Mechanical Sciences**. Vol. 39, pp. 1273-1314, 1997.
9. Astakhov, V. P. A treatise on material characterization in the metal cutting process. Part 1: A novel approach and experimental verification. **Journal of Materials Processing Technology**. V. 96. pp. 22-33, 1999.

10. Shaw , M. C. ***Metal Cutting Principles***. Great Britan.Clarendon Press. 1984.
  
11. Astakhov, V. P. A treatise on material characterization in the metal cutting process. Part 2: Cutting as the fracture of workpiece material. ***Journal of Materials Processing Technology***. V. 96. pp. 34-41, 1999.
  
12. Grzesik, W. A revised model for predicting surface roughness in turning. ***Wear***. Vol. 194. pp. 143-148. 1996.
  
13. Abouelatta, O. B.; Máld, J, Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations. ***Journal of Materials Processing Technology***. Vol. 118, pp. 269-277, 2001.
  
14. Kovac, P., Sidjanin, L. Investigation of chip formation during milling. ***International Journal of Production Economics***. Vol. 51, pp. 149-153, 1997.
  
15. Saï, W. B.; Salh, N. B.; Lebrun, J. L., Influence of machining by finishing milling on surface characteristics. ***International Journal of Machine Tools & Manufacturing***. Vol. 41, pp. 443-450, 2001.
  
16. Komanduri, R.; Von Turkovich, B.F. New observations on the mechanism of chip formation when maching titanium alloys. ***Wear***. V.69. pp.179-188, 1981.
  
17. Jang, D. Y.; Choi, Y.Gu; Kim, H-Gil; Hsio, A. Study of the correlation between surface roughness and cutting vibrations to develop on line roughness measuring technique in hard turning. ***International Journal of Machine Tools & Manufacturing***. Vol. 36, pp. 453-464, 1996.
  
18. Ferraresi, D. ***Fundamentos da Usinagem dos Metais***.São Paulo. Edgard Blücher Ltda.1977.
  
19. Guimarães, A.R. ***Sistema para a medição das componentes da força de usinagem em operações de torneamento***. Trabalho de Formatura.

Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2000.

20. **Catálogo de Dinamômetros Piezoelétricos** – Kiestler AG.

21. Katayama, S.; Hashimura, M. Effect of carbon phosphorus and nitrogen contents in steel on machined surface cutting. **ISIJ International**. V. 30. pp. 457-563, 1990.

22. Komanduri, R. Hou, Z.B. Thermal modeling of the metal cutting process. Part I: Temperature raise distribution due to shear plane heat source. **International Journal of Mechanical Sciences**. V.42. pp. 1715-1752, 2000.

23. Strafford, K. N. Indirect monitoring of machinability in carbon steels by measurement of cutting forces. **Journal of Materials Processing Technology**. V. 67. pp. 150-156, 1997.

24. Dimla E. Dinla Sr., Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations – a review of methods. **International Journal of Machine Tools & Manufacturing**. Vol. 40, pp. 1073-1098, 2000.

25. Dimla E. Dinla Sr.; Lister, P.M. On-line metal cutting tool condition monitoring. I: Force and vibration análise. **International Journal of Machine Tools & Manufacturing**. Vol. 40, pp. 739-768, 2000.

26. Hamid, A. A.; Ali, Y. Experimental determination of dynamic forces during transient orthogonal turning. **Journal of Materials Processing Technology**. Vol. 55, pp. 162-170, 1995.

27. Lin, W. S.; Lee, B. Y.; Wu, C. L. Modeling the surface roughness and cutting force for turning. **Journal of Materials Processing Technology**. Vol. 108, pp. 286-293, 2001.

28. Cabral, E. L.; Apostila PMR2400, **Sistemas de Aquisição de Dados**, 2006.

29. Haslam, J. A.; Summers, G. R.; Williams, D. , ***Engineering instrumentation and control***, Edward Arnold Publishers, 1981, Inglaterra.
30. Chandrakant, D. ***Introduction to finite element method***, Van Nostrand, New York, 1942.
31. Thorus Scisoft – Soluções Inovadoras. Fornece software de MEF [www.thorus-scisoft.com.br](http://www.thorus-scisoft.com.br) . Acesso em 12 dez. 2006.
32. Batista, E. F. ***Análise de tensões resultantes do processo de torneamento usando o método dos elementos finitos (MEF)***, São Paulo, EPUSP, 2005.
33. Wikipedia - free Encyclopedia. ***AISI Steel Grades***, disponível em [http://en.wikipedia.org/wiki/AISI\\_steel\\_grades](http://en.wikipedia.org/wiki/AISI_steel_grades) . Acesso em: 20 out. 2007.
34. Yaldiz, S.;Unsaçar, F. ***Design, development and testing of a turning dynamometer for cutting force measurement***, Materials & Design, 2004.

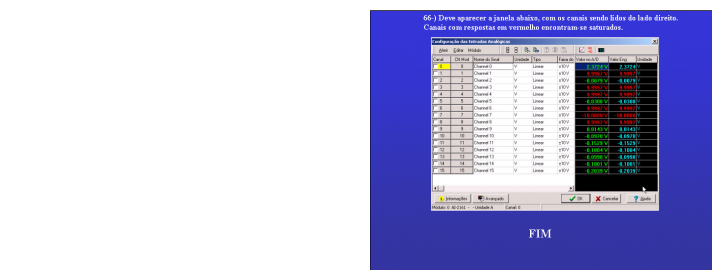
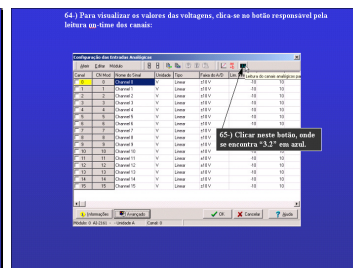
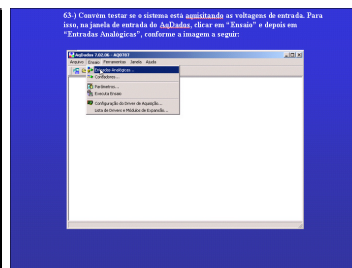
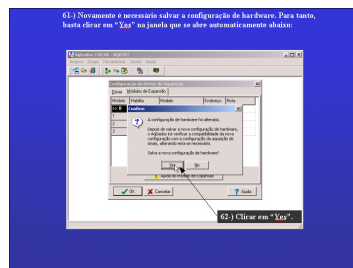
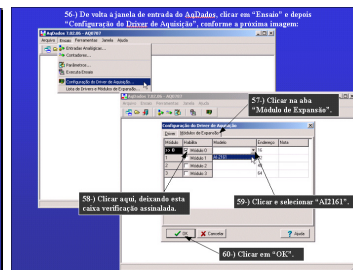
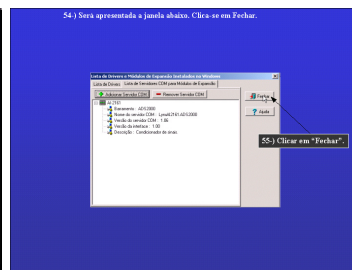
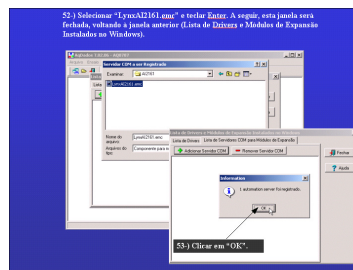
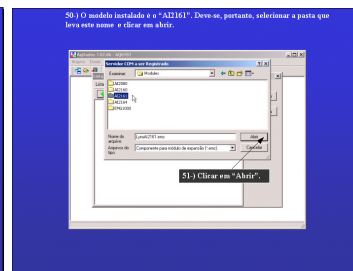
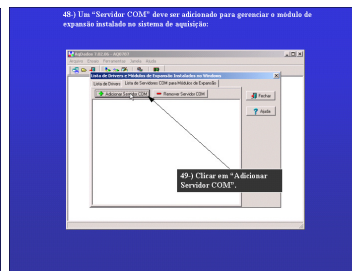
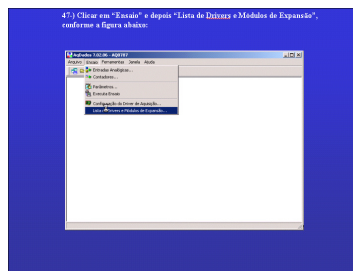
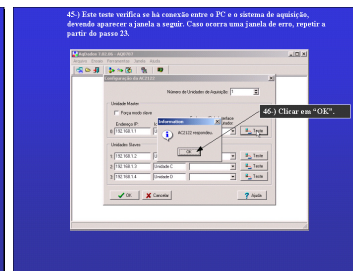
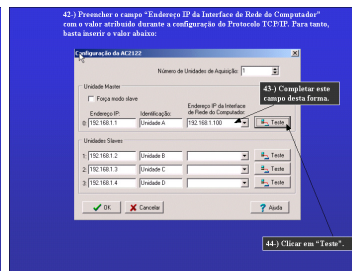
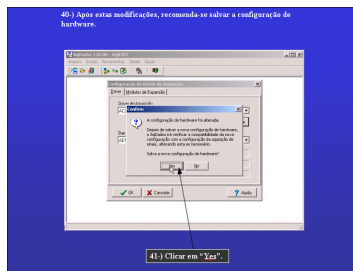


# Anexo 1 – Guia de Instalação do Sistema de Aquisição

**Instalação do software AdDados para utilização do Sistema de Aquisição da Lynx**

Este guia foi elaborado utilizando o sistema operacional Windows 2000 Professional, Service Pack 4. O processo de instalação pode variar ligeiramente dependendo do sistema operacional disponível. Para verificar a compatibilidade com outras plataformas/versões, consultar manual eletrônico do AdDados disponível on-line (Clique Duplo para Abrir).

- 1.) Insere a Hard Key na Porta Paralela do PC antes de iniciar a instalação.
- 2.) Insere o CD de instalação e aguarda a seguinte janela (verificar "autorun").
- 3.) Clicar em "Instala o AqDados".
- 4.) Aparecerá a seguinte janela:
- 5.) Clicar em "Next".
- 6.) A janela seguinte da resposta à licença de uso do software:
- 7.) Clicar em "Yes".
- 8.) Insere Nome e Empresa nos campos correspondentes. A instalação será feita independentemente dos valores preenchidos.
- 9.) Clicar em "Next".
- 10.) Escolher o diretório onde o software será instalado. Recomenda-se manter a pasta sugerida pelo programa de instalação.
- 11.) Clicar em "Next".
- 12.) Opções de Instalação do Programa. Recomenda-se efetuar a instalação padrão (Express).
- 13.) Clicar em "Next".
- 14.) Aparecerá local e descrever o nome da pasta a ser criada no "Menu Iniciar" do Windows.
- 15.) Clicar em "Next".
- 16.) Janela para confirmação das opções. Ao clicar em "Next", será feita a instalação do software.
- 17.) Clicar em "Next".
- 18.) Janela de conclusão da instalação. Serão mostrados os atalhos criados.
- 19.) Clicar em "Finish".
- 20.) Atalhos criados.
- 21.) Após a instalação é recomendável reiniciar o Windows para utilizar o software. Pode-se reiniciar imediatamente ou escolher encerrar depois.
- 22.) Clicar em "Finish".
- 23.) Certifique-se de que o sistema de aquisição esteja ligado e que o cabo de rede esteja corretamente conectado a placa de rede do PC.
- 24.) Execute o "Painel de Controle" e depois abra a janela de "Conexões de rede" ou de "rede" no equivalente (dependendo da versão do Windows utilizado).
- 25.) Clique duplo em "Conexões de rede".
- 26.) Entre nas propriedades da conexão correspondente à placa de rede onde o sistema de aquisição está conectado.
- 27.) Clique com o botão direito e escolha propriedades.
- 28.) Serão mostradas as opções para a conexão da placa de rede conforme a janela abaixo:
- 29.) Soluções: "Protocolo Internet (TCP/IP)".
- 30.) Clique em "Propriedades".
- 31.) Preencher os campos conforme o mostrado abaixo. Pode-se deixar os servidores DNS em branco.
- 32.) Clique em "OK".
- 33.) Execute o programa "AqDados7.02", cujo atalho se encontra na "Área de Trabalho", conforme imagem abaixo.
- 34.) Duplo clique neste link.
- 35.) Após abrir o programa, clicar em "Executar" e depois "Configuração do Driver de Aquisição...".
- 36.) Em "Driver de Aquisição:" escolher "AC1212-VA", conforme a imagem abaixo.
- 37.) Em "Barramento de Expansão:" escolher "AIS2000", conforme a imagem abaixo.
- 38.) Quando a janela apresentar as opções conforme mostrado abaixo, clicar em "Configurar" para definir como será feita a comunicação com o PC. A seguir, automaticamente será aberta uma janela, como mostra a próxima slide.
- 39.) Clicar em "Configurar".





## Anexo 1 – Guia de Calibração do Sensor

